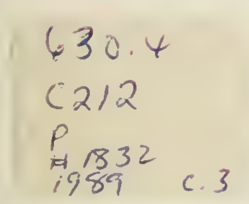


Manutention de produits agricoles

Appareils de déplacement d'air et transporteurs pneumatiques





Manutention de produits agricoles

Appareils de déplacement d'air et transporteurs pneumatiques

Direction générale de la recherche
Agriculture Canada

Publication 1832/F
1989

Nº de catalogue A15-1832/1989F
ISBN 0-660-13086-6
Imprimé en 1989

En vente au Canada par l'entremise
de nos agents libraires agrées et
autres libraires, ou par la poste au

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnements et Services Canada
Ottawa (Ontario) Canada K1A 0S9

Prix sujet à changement sans préavis

Publié antérieurement sous le titre :
Manutention de produits agricoles.
2.2. Appareils de déplacement d'air et transporteurs pneumatiques.
Agriculture Canada, publ. 5002.

Données de catalogage pour le Canada

Manutention de produits agricoles : appareils de
déplacement d'air et transporteurs pneumatiques

(Publication ; 1832F)

Publié antérieurement sous le titre : Manutention de
produits agricoles. 2.2 Appareils de déplacement
d'air et transporteurs pneumatiques.
Publié aussi en anglais sous le titre : Handling
Agricultural materials : air and pneumatic conveyors.
Préparé par la UMA Engineering Ltd. cf. Av.-pr.
Bibliogr.: p.
No. de cat. A15-1832/1989F
ISBN 0-660-13086-6

1. Convoyeurs. 2. Machines agricoles. 3. Machines
pneumatiques. I. Rousseau, Normand, 1951-
II. Heslop, L. III. Canada. Agriculture Canada.
Direction générale de la recherche. IV. UMA Engineering
Ltd. V. Collection: Publication (Canada. Agriculture
Canada). Français ; 1832F.

TJ1350H314 1989 621.8'67 C89-099206-1

Rédaction-édition
Normand Rousseau
Service aux programmes de recherche

Conseillère scientifique, recherches à contrat
L. Heslop
Centre de recherches techniques et de statistique

TABLE DES MATIÈRES

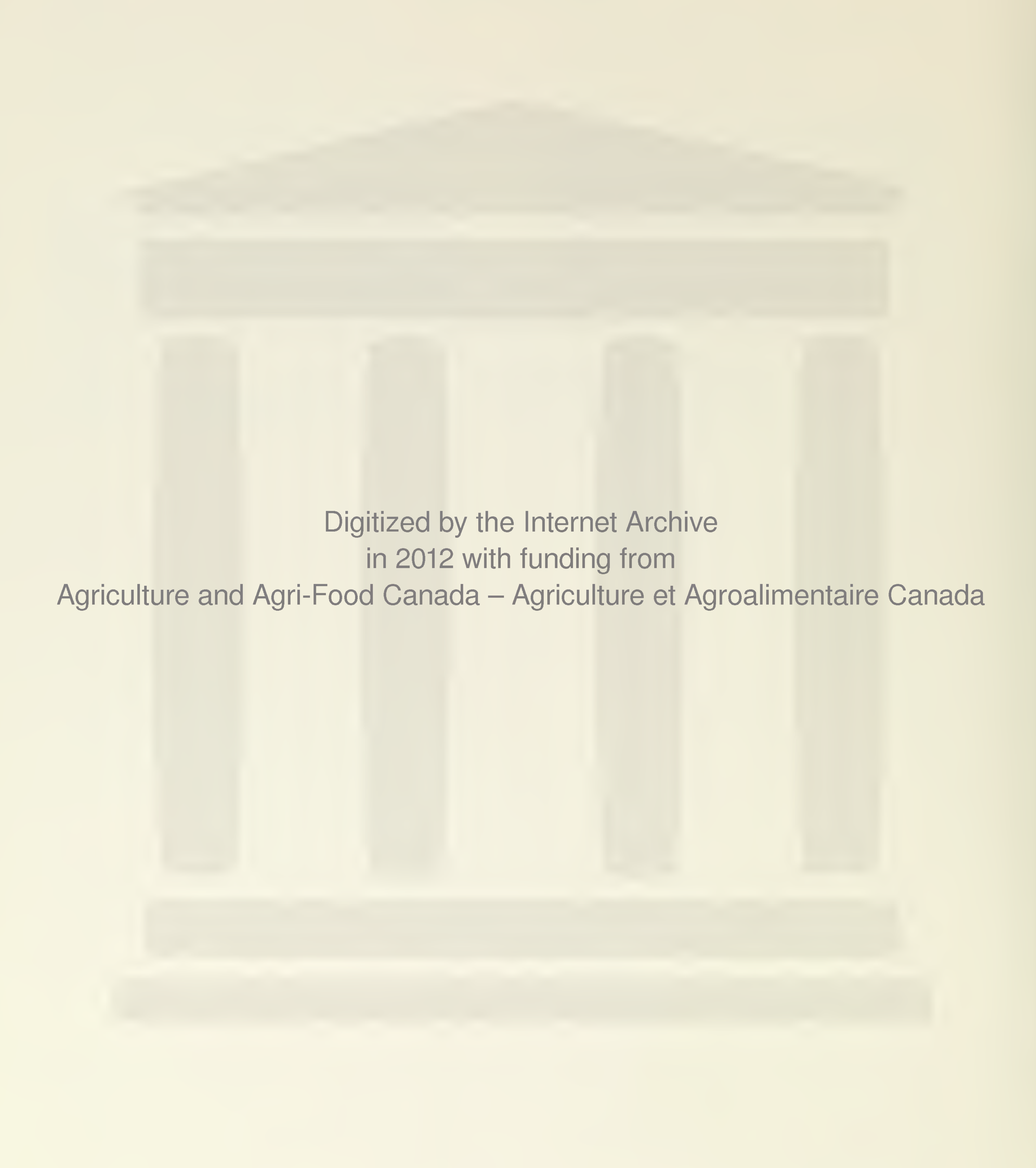
Tableaux

Figures

AVANT-PROPOS

La publication *Manutention de produits agricoles* comprend plusieurs parties et c'est un guide rédigé à l'intention des concepteurs de systèmes de manutention de produits, tant pour le secteur agricole que pour les secteurs connexes. Chaque section traite du choix et de la conception de matériels de manutention et de transformation de produits. Les éléments décrits peuvent avoir à fonctionner d'une manière indépendante ou comme composantes d'un système. La conception d'un système peut nécessiter l'utilisation de renseignements tirés de plusieurs sections du manuel.

La publication *Appareils de déplacement d'air et transporteurs pneumatiques* a été préparée par la UMA Engineering Ltd. de Winnipeg (Man.) pour le Comité canadien du génie rural du Comité de coordination des services agricoles du Canada.



1 GÉNÉRALITÉS

1.1 Appareils de déplacement d'air

Au Canada, les appareils de déplacement d'air les plus répandus dans les installations agricoles sont les ventilateurs, les soufflantes et les compresseurs. Pour être efficace, toutefois, l'utilisation de ces appareils suppose une compréhension des propriétés de l'air et une connaissance des divers types de systèmes de déplacement d'air et de leurs composantes.

1.2 Transporteurs pneumatiques

Les transporteurs pneumatiques offrent un moyen pratique de manutentionner les grains et se révèlent utiles dans les endroits où l'espace est restreint et lorsque la canalisation de transport change souvent de direction. Un nombre croissant d'établissements agricoles et commerciaux utilisent les transporteurs pneumatiques dans la manutention des grains, des aliments pour animaux et de certains engrais.

2 PROPRIÉTÉS DE L'AIR ET DES CONDUITS

2.1 Propriétés et comportement de l'air

L'air de l'atmosphère est un mélange gazeux, surtout d'azote et d'oxygène, et chargé de vapeur d'eau. L'air de référence utilisé dans l'évaluation des ventilateurs et des soufflantes a une densité de 1,2 kg/m^3, à une température de 20 °C et une pression atmosphérique de 100 kPa.

Comme l'air obéit aux lois des gaz parfaits, sa densité varie en fonction de la pression et de la température. Toutefois, les variations de densité de l'air n'ont qu'un effet minime sur les systèmes de transport d'air, si ce n'est que cette caractéristique est liée à la puissance requise par les ventilateurs.

Dans la conception des systèmes de manutention des produits agricoles, calculer les besoins en énergie en fonction de la température ambiante, en hiver. Un système de déplacement d'air transportant de l'air à −40 °C, par exemple, requiert 26 % plus d'énergie que s'il est utilisé dans des conditions normales. Les fabricants de ventilateurs fournissent des facteurs de correction qui tiennent compte des variations de la pression atmosphérique et de la température ambiante (tableau 1).

Même si l'air est un gaz compressible, on devrait l'assimiler à un gaz incompressible dans les systèmes à basse pression (environ 10 % de la pression atmosphérique). Dans les autres cas, toutefois, ne pas négliger la question de la compressibilité de l'air.

Le degré hygrométrique de l'air n'a pas d'effet marqué sur le rendement d'un ventilateur. Un degré hygrométrique élevé peut réduire légèrement la puissance requise; généralement, toutefois, il n'est pas tenu compte de son effet.

2.2 Propriétés des conduits de transport d'air

Il faut faire preuve de discernement dans le choix des conduits des systèmes de transport d'air, qu'il s'agisse de dépoussiérage ou de transport de produits. N'utiliser que des conduits de section circulaire : leur ratio «surface d'écoulement/surface de frottement» est élevé. Utiliser des raccords «rond/carré» aux points d'introduction des poussières et aux points de déversement des matières dans les collecteurs.

Utiliser des conduits roulés ou à joints longitudinaux, sertis et soudés.

Former des coudes à grand rayon de courbure. Les coudes à onglet ne sont pas recommandés. Le choix des matériaux de construction est fonction des produits manutentionnés et de la corrosiveté de l'atmosphère ambiante.

Utiliser les normes de la Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association (SMACNA) ou de l'American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) pour déterminer l'épaisseur des parois des conduits. Accroître l'épaisseur des parois des conduits utilisés en service continu ou dans la manutention de produits abrasifs.

Ne pas utiliser de matériaux non métalliques dans les systèmes de transport de produits agricoles. Les matériaux non conducteurs peuvent en effet entraîner une accumulation excessive d'électricité statique et être ainsi à l'origine de blessures ou d'explosions de poussières. Les normes du Commissaire fédéral des incendies relatives aux silos à grains prévoient que les canalisations et les goulottes doivent toutes être faites de matériaux conducteurs d'électricité et mises à la terre. Le tuyau de plastique couramment utilisé dans le remplissage des silos-tours fait cependant exception; dans ce cas, en effet, la teneur élevée en humidité des produits ensilés évite l'accumulation d'électricité statique.

Tableau 1 Facteur de correction de la densité

Temp., °C	Altitude (mètres au-dessus de la mer)										
	-250	0	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2500	3000
-40	1,30	1,26	1,23	1,18	1,14	1,10	1,06	1,00	0,98	0,94	0,90	0,87
-18	1,18	1,15	1,12	1,08	1,04	1,00	0,96	0,92	0,90	0,86	0,82	0,79
0	1,11	1,08	1,05	1,02	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,86	0,81	0,76
21	1,03	1,00	0,97	0,95	0,92	0,89	0,87	0,84	0,82	0,79	0,75	0,71
50	0,94	0,91	0,89	0,86	0,84	0,81	0,79	0,77	0,75	0,72	0,68	0,64
75	0,87	0,85	0,82	0,80	0,78	0,75	0,73	0,71	0,69	0,67	0,63	0,60
100	0,81	0,79	0,77	0,75	0,72	0,70	0,68	0,66	0,65	0,63	0,59	0,56
150	0,72	0,70	0,68	0,66	0,64	0,62	0,60	0,59	0,57	0,55	0,52	0,49
200	0,64	0,62	0,61	0,59	0,57	0,56	0,54	0,52	0,51	0,49	0,47	0,44
250	0,58	0,56	0,55	0,53	0,52	0,50	0,49	0,47	0,46	0,45	0,42	0,40
300	0,53	0,51	0,50	0,49	0,47	0,46	0,45	0,43	0,42	0,41	0,38	0,36
350	0,49	0,47	0,46	0,45	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,35	0,33
400	0,45	0,44	0,43	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,33	0,31
450	0,42	0,41	0,40	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,30	0,29
500	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,28	0,27

kg/m^3 = facteur de densité × 1,2
masse de l'air sec à 21 °C, au niveau de la mer = 1,2 kg/m^3
Source : *Industrial ventilation, a manual of recommended practice.*

3 VENTILATEURS ET SYSTÈMES DE VENTILATION

3.1 Choix d'un ventilateur

Pour choisir un ventilateur, tenir compte des facteurs suivants :

- le débit d'air
- la pression statique du ventilateur
- la nature des matières qui auront à traverser le ventilateur :
  - a) matières fibreuses — choisir un ventilateur en mesure de supporter les charges imposées par les poussières lourdes
  - b) air propre — choisir un ventilateur ordinaire
  - c) matières corrosives
  - d) matières explosives ou inflammables — choisir un ventilateur fait d'aluminium non susceptible de produire des étincelles
- le type d'entraînement (prise directe ou transmission à courroie)
- l'encombrement
- le niveau de bruit
- la température et l'altitude de service
- le régime de service

Dans la documentation des fabricants, on peut trouver des renseignements sur le débit d'air, la pression de service et le régime maximums des ventilateurs disponibles. Pour obtenir de bons résultats, choisir un ventilateur fonctionnant dans le tiers médian des débits d'air disponibles (fig. 1).

Des courbes de rendement des ventilateurs représentant le débit d'air délivré à diverses pressions peuvent parfois être obtenues des fabricants de ventilateurs. Ces graphiques aident à comprendre en quoi les caractéristiques d'un ventilateur peuvent exercer une influence sur la conception d'un système.

Le rendement d'un ventilateur varie en fonction de sa vitesse de rotation. De même, le rendement d'un réseau de canalisations à un débit d'air donné est fonction de sa résistance.

En portant sur un graphique la courbe de rendement du ventilateur et celle du réseau de canalisations, on obtient le point de fonctionnement optimal à l'intersection des courbes. À un débit d'air donné, la pression fournie par le ventilateur doit être égale à la pression créée dans le réseau (fig. 2).

3.2 Lois de rendement des ventilateurs

Le rendement d'un ventilateur est soumis à de nombreuses lois; il est notamment lié à des

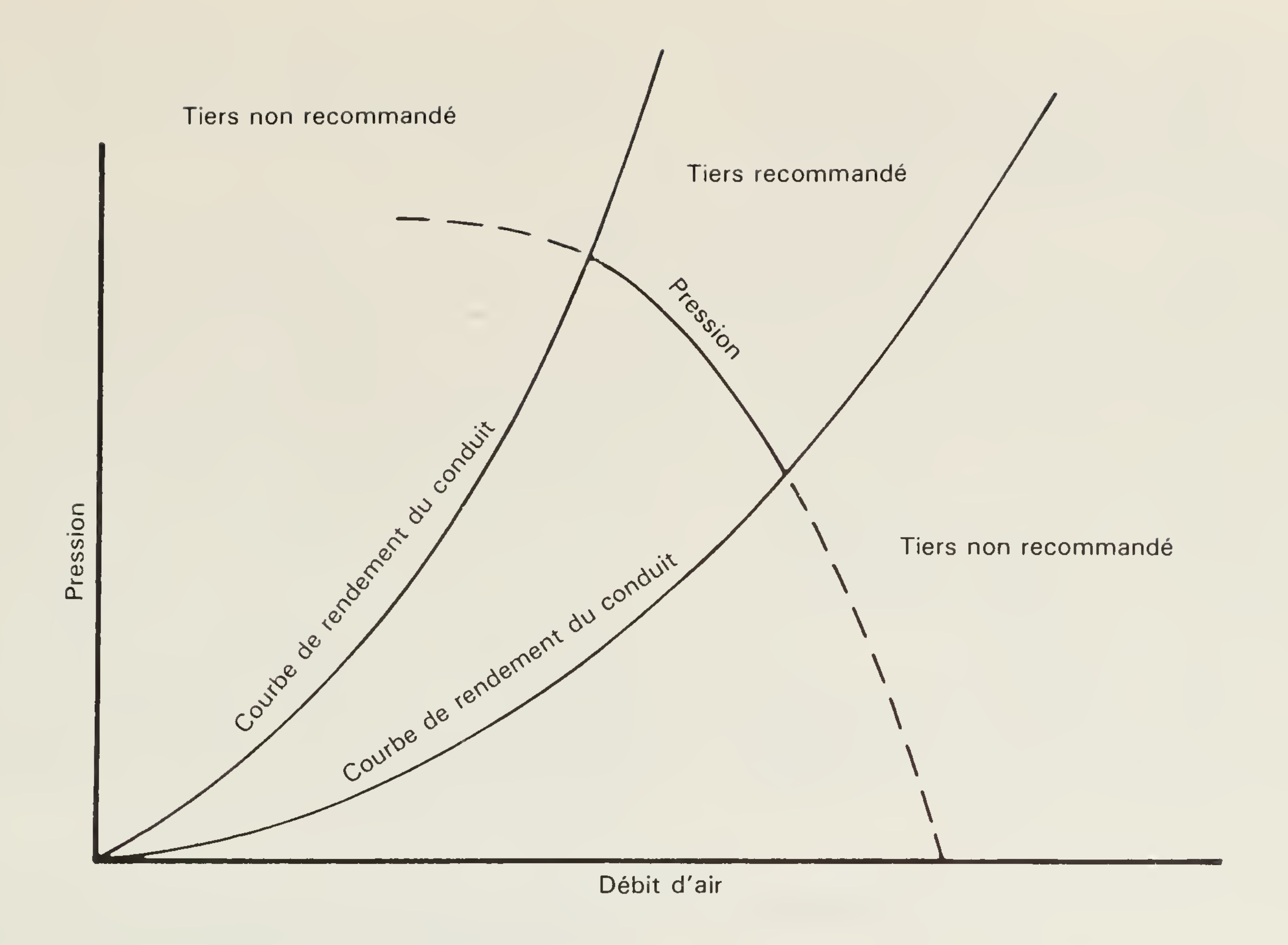


Fig. 1. Rendement recommandé d'un ventilateur centrifuge typique.
Source : Industrial ventilation, a manual of recommended practice.

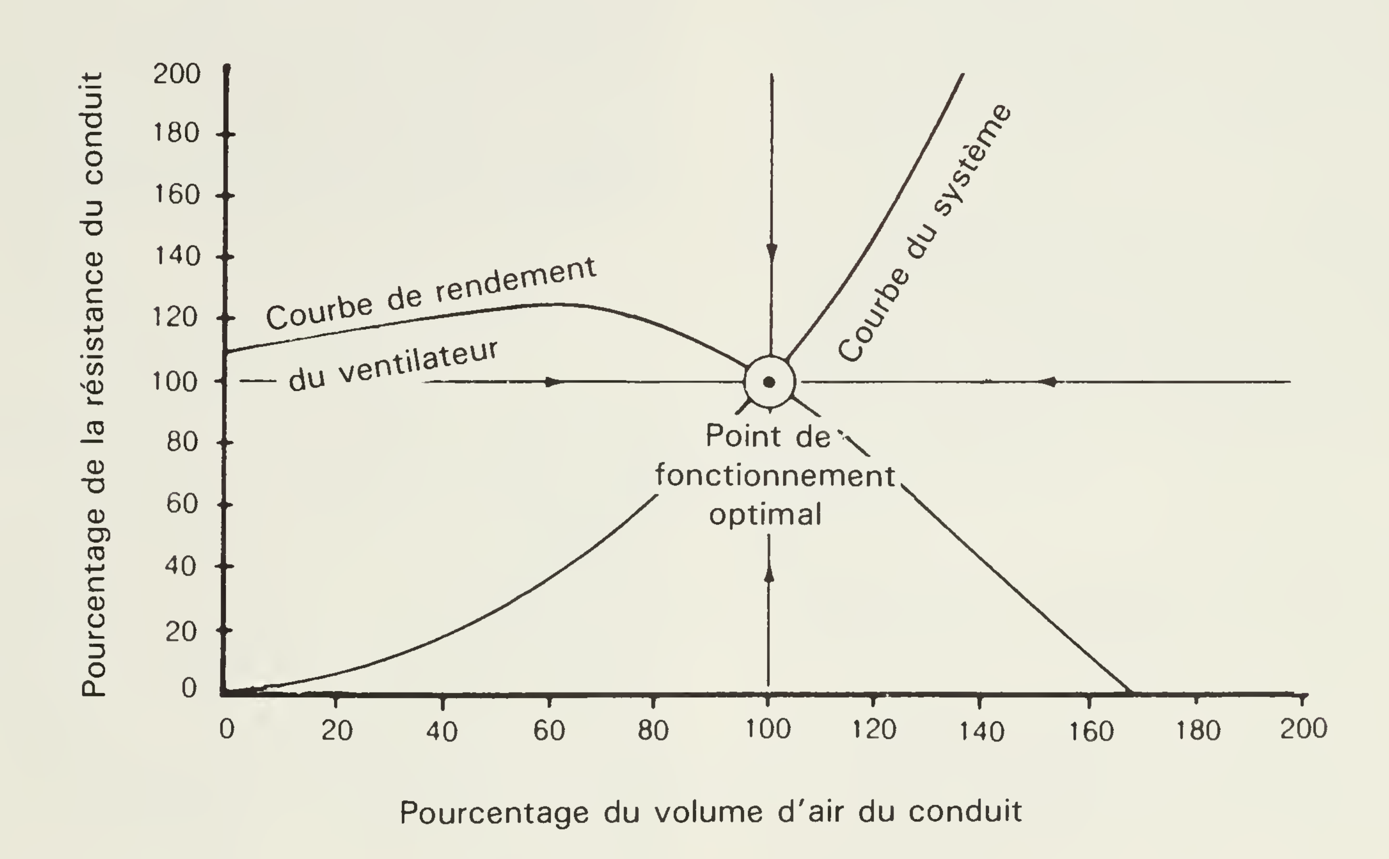


Fig. 2 Rapport entre la courbe de rendement d'un ventilateur et celle d'un système de transport pneumatique.
Source : Fan application manual : Fans and fan systems.

facteurs comme la taille du ventilateur, le régime, la pression et le volume. Trois lois de rendement sont particulièrement importantes pour le concepteur de système.

- Le débit d'air est fonction du régime du ventilateur.
- La pression statique et la pression totale varient en fonction du carré du régime du ventilateur.
- La puissance varie en fonction du cube du régime du ventilateur.

La figure 3 montre l'effet d'un accroissement de 10 % du régime d'un ventilateur sur le débit d'air, la pression et la puissance. La figure 4 montre l'effet d'un accroissement de 20 % du débit d'air sur la pression-réseau.

Pour les réseaux d'aspiration ou les transporteurs pneumatiques, choisir un ventilateur dont le débit d'air est peu sensible aux variations de pression-réseau.

3.3 Utilisation des ventilateurs en parallèle et en série

Les ventilateurs utilisés en parallèle fournissent un débit d'air égal à la somme des débits d'air de chacun aux points d'égale pression (fig. 5). Les ventilateurs utilisés en série fournissent une pression totale égale à la somme des pressions de chacun aux points d'égal débit (fig. 6). Au moment d'énoncer les spécifications d'un réseau faisant appel à l'un ou l'autre système, le concepteur tiendra compte des pertes imputables au raccordement des ventilateurs.

Des ventilateurs identiques donnent dans ce cas de meilleurs résultats. Avant d'utiliser des ventilateurs dissemblables, on en analysera avec soin les caractéristiques afin de s'assurer que chacun donnera le rendement escompté dans les conditions de service prévues.

3.4 Pression-réseau

Deux pressions distinctes interviennent dans la compression ou la dilatation d'un fluide circulant dans un conduit ou un tuyau : la pression statique et la pression dynamique. La pression statique, qui peut être négative ou positive, correspond à la différence entre la pression exercée perpendiculairement au sens de l'écoulement et la pression atmosphérique. La pression dynamique, qui se mesure dans le sens de l'écoulement, est la pression cinétique nécessaire pour maintenir le fluide à une vitesse constante.

Pour un écoulement donné d'air ou de gaz dans un conduit, la pression totale peut s'écrire, algébriquement :

$$P_t = P_s + P_v$$

où P_t = pression totale (kPa)

P_s = pression statique (kPa)

P_v = pression dynamique (kPa)

La pression totale, la pression dynamique et la pression statique se mesurent avec des instruments comme le tube de Pitot ou l'anémomètre. La pression totale se mesure dans le sens de l'écoulement.

On trouvera des renseignements sur le calcul des pressions dans des publications comme *Industrial Ventilation* de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists et le *ASHRAE Handbook* de l'American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers.

3.5 *Pression statique* La pression statique est la pression requise pour vaincre la résistance d'un fluide à l'écoulement. C'est pourquoi elle est parfois appelée pression de frottement ou de résistance.

3.6 *Pression dynamique* Dans les transporteurs pneumatiques, la pression dynamique s'exerce de deux façons. Premièrement, elle désigne la pression de mise en vitesse des fluides. Deuxièmement, elle résulte des pertes dynamiques qui se produisent quand les conduits changent de forme ou d'orientation. Ces changements sont à l'origine de turbulences et de pertes d'énergie. Pour calculer ces pertes, on utilise la formule :

$$\text{Perte} = F \times P_v$$

où F = coefficient de perte

P_v = (vitesse(m/s)/1,29)^2

Le tableau 1 présente une liste de facteurs de correction à appliquer à de l'air non standard (par opposition à l'air de référence).

L'écoulement des fluides dans un réseau de transport étant toujours un phénomène dynamique, il faut s'attendre à des pertes de charge. Pour calculer les pertes de charge, utiliser les formules empiriques présentées dans les problèmes types de la section 8. Utiliser également les graphiques des figures 7 et 8 pour améliorer la précision des calculs et déterminer par déduction la valeur de paramètres inconnus comme le coefficient de rugosité ou le frottement des produits. Utiliser les calculs théoriques et faire preuve de bon sens.

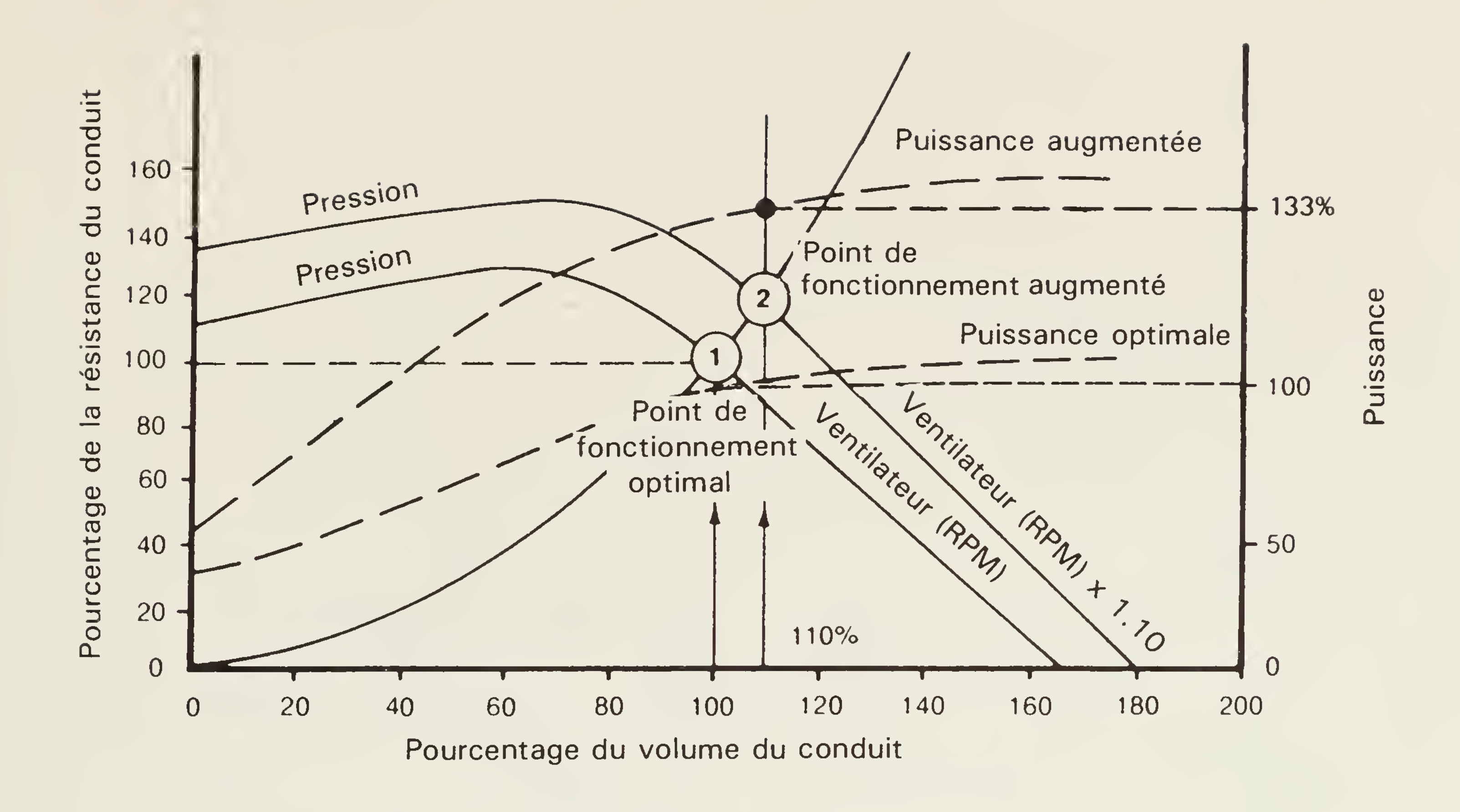
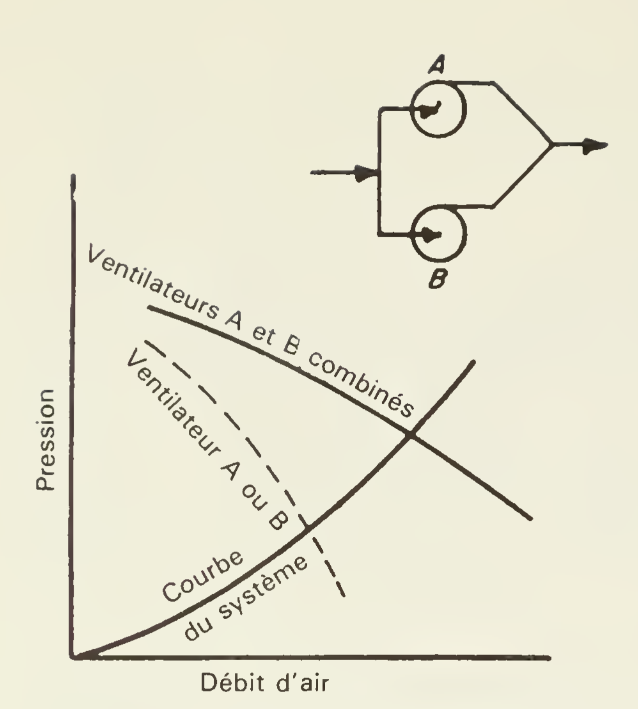


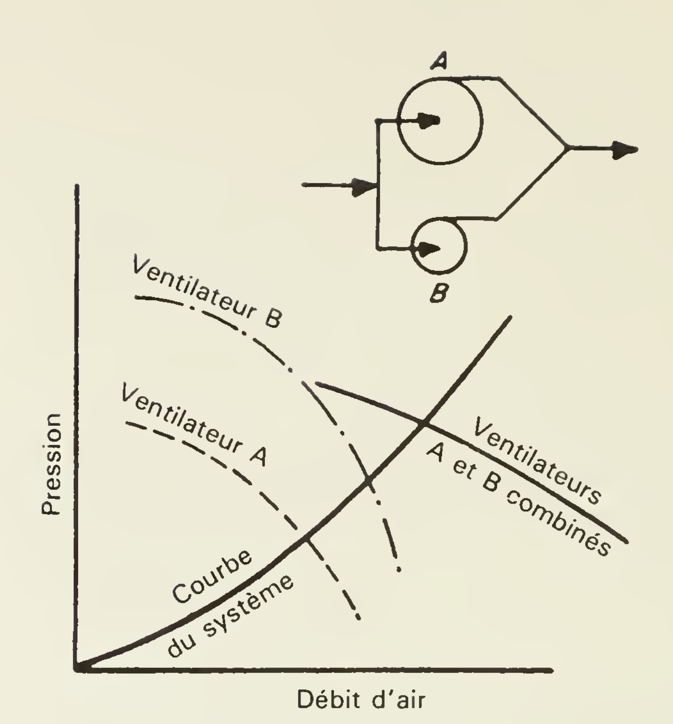
Fig. 3 Effet d'un accroissement de 10 % de la vitesse d'un ventilateur.
Source : Fan application manual : Fans and fan systems.

Pourcentage de la résistance du conduit
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
Point de fonctionnement augmenté
Point de fonctionnement optimal
Courbe du système
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
Pourcentage du volume du conduit

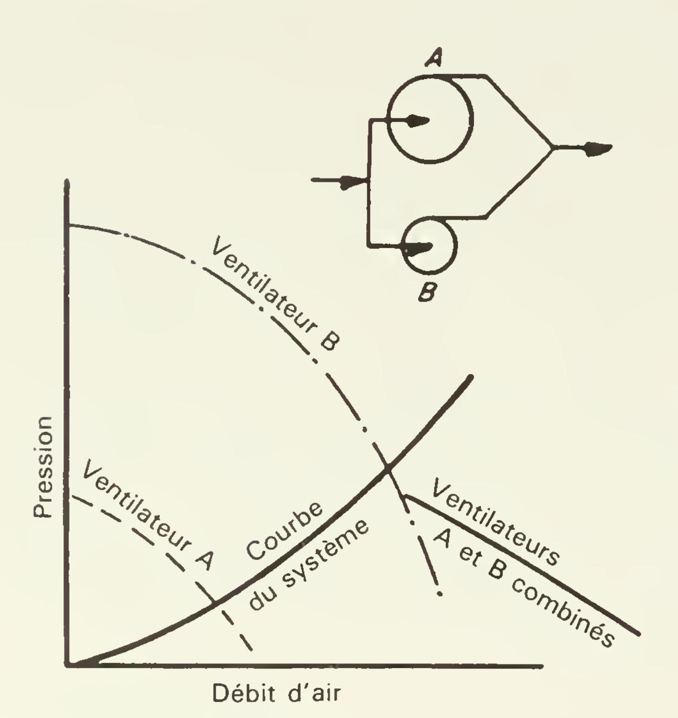
Fig. 4 Effet sur la pression totale d'un accroissement de 20 % du débit.
Source : Fan application manual : Fans and fan systems.



Pour obtenir la plus grande efficacité, on recommande l'emploi de deux ventilateurs identiques.



On obtient une bonne efficacité avec deux ventilateurs différents.



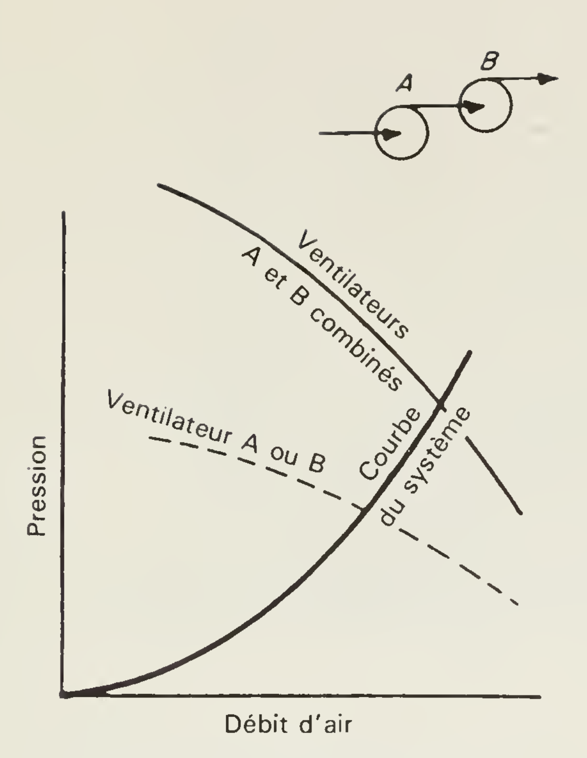
On obtient une mauvaise efficacité avec deux ventilateurs différents.

Lorsque la courbe du système ne rencontre pas la courbe des ventilateurs combinés avant le ventilateur B, celui-ci fait circuler plus d'air que les ventilateurs A et B en parallèles.

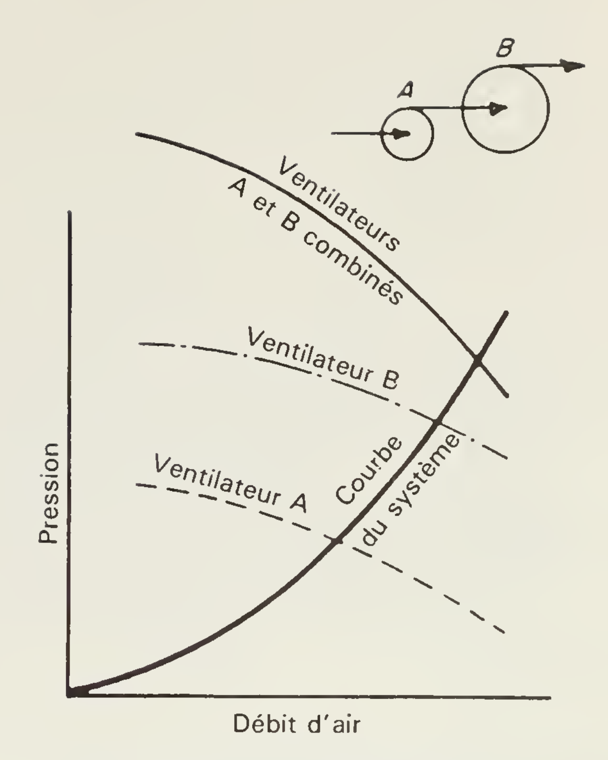
Nota :

1. La courbe du système doit rencontrer la courbe des ventilateurs combinés ou le ventilateur qui fournit une pression plus grande peut faire circuler à lui seul plus d'air.

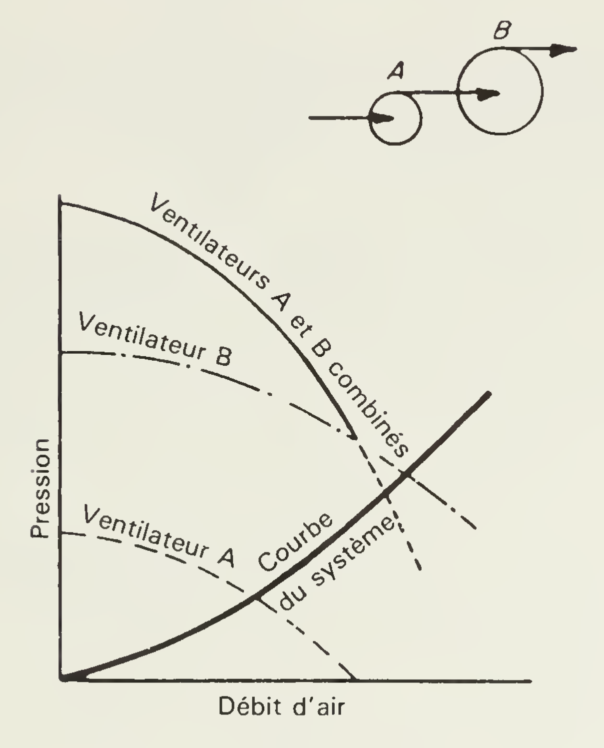
Fig. 5 Ventilateurs utilisés en parallèle.
Source : Industrial ventilation, a manual of recommended practice.



On obtient le plus grand rendement avec deux ventilateurs identiques.



On obtient un bon rendement avec deux ventilateurs différents.



On obtient un mauvais rendement avec deux ventilateurs différents.

Lorsque la courbe du système ne croise pas la courbe des ventilateurs combinés ou croise la courbe combinée en projection avant la courbe du ventilateur B, le ventilateur B fera circuler plus d'air que les ventilateurs A et B en séries.

Nota :

1. La courbe du système doit croiser la courbe des ventilateurs combinés ou ceux-ci doivent faire circuler plus d'air à eux seul.

2 Le volume d'air propulsé par chaque ventilateur sera le même étant donné que l'air est incompressible.

Fig. 6 Ventilateurs utilisés en série.
Source : Industrial ventilation, a manual of recommended practice.

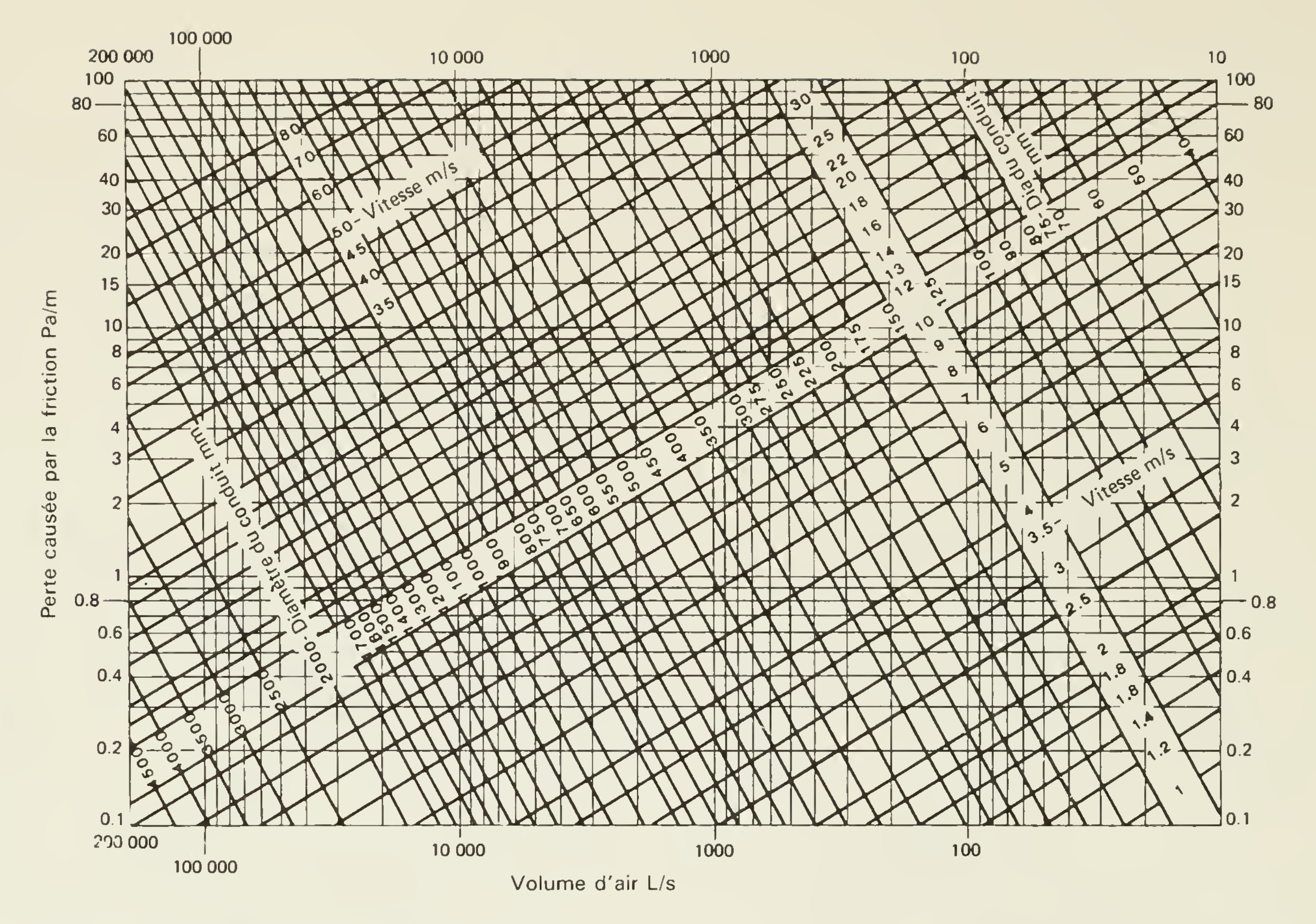


Fig. 7 Pertes de charge par frottement.
Source : ASHRAE handbook, S.I. edition.

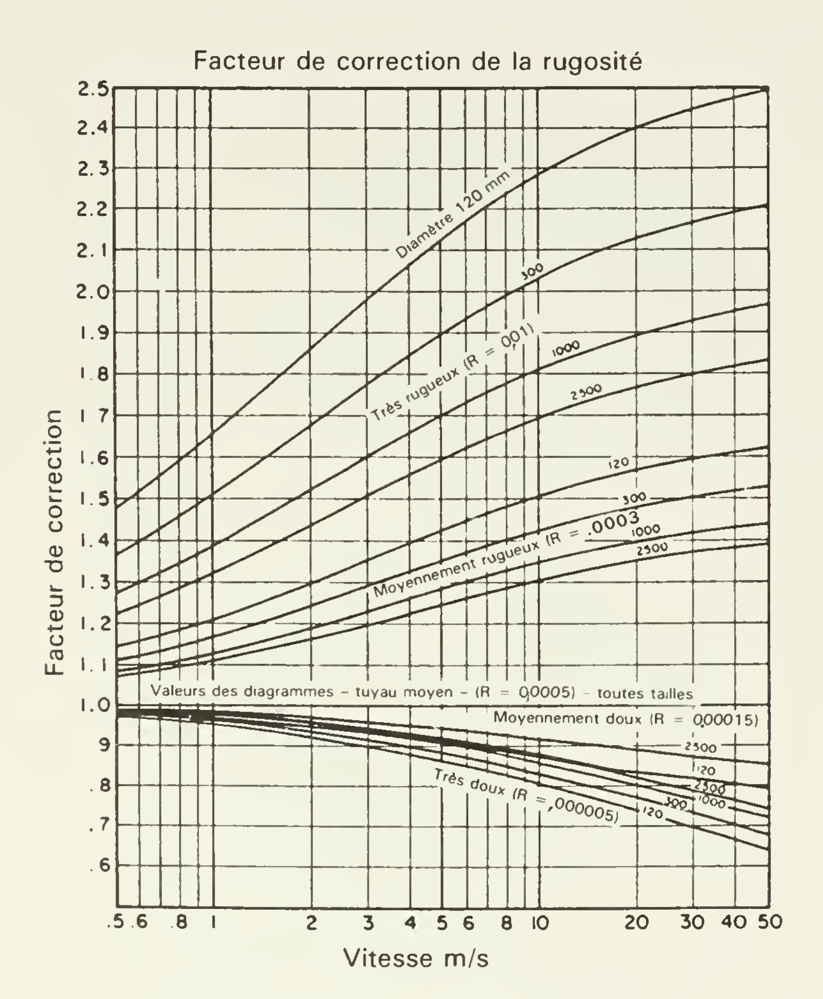


Fig. 8 Facteurs de correction de la rugosité.
Source : Industrial ventilation, a manual of recommended practice.

3.7 Appareils de déplacement d'air

Les ventilateurs et les soufflantes produisent les écoulements d'air qu'on utilise pour faire circuler, aspirer ou refouler d'importants volumes d'air ou de gaz. On distingue essentiellement deux types d'appareils de déplacement d'air : les ventilateurs et les soufflantes à déplacement positif.

Il ne faut pas confondre soufflantes et ventilateurs. L'un et l'autre utilisent la force centrifuge pour entraîner un déplacement d'air. Les soufflantes (ou les compresseurs), toutefois, font appel à un déplacement positif pour aspirer de l'air dans une chambre fermée, le comprimer, puis le libérer sous pression dans un réseau de conduits. Les ventilateurs, en revanche, ne font que déplacer l'air. Un ventilateur peut être assimilé à une soufflante si la résistance à l'écoulement s'exerce principalement en aval du ventilateur.

On distingue trois principaux types de ventilateurs :

- les ventilateurs hélicoïdes
- les ventilateurs centrifuges
- les ventilateurs spéciaux

3.8 *Ventilateurs hélicoïdes* Les ventilateurs hélicoïdes, également appelés ventilateurs à hélice, fournissent des débits d'air élevés, sous faible pression statique. On les affecte le plus souvent à des fonctions générales de ventilation ou de brassage. Avec ces ventilateurs, une faible variation de pression peut entraîner d'importantes variations du débit d'air. La figure 9 présente trois types de ventilateurs hélicoïdes et donne pour chacun des courbes de rendement types.

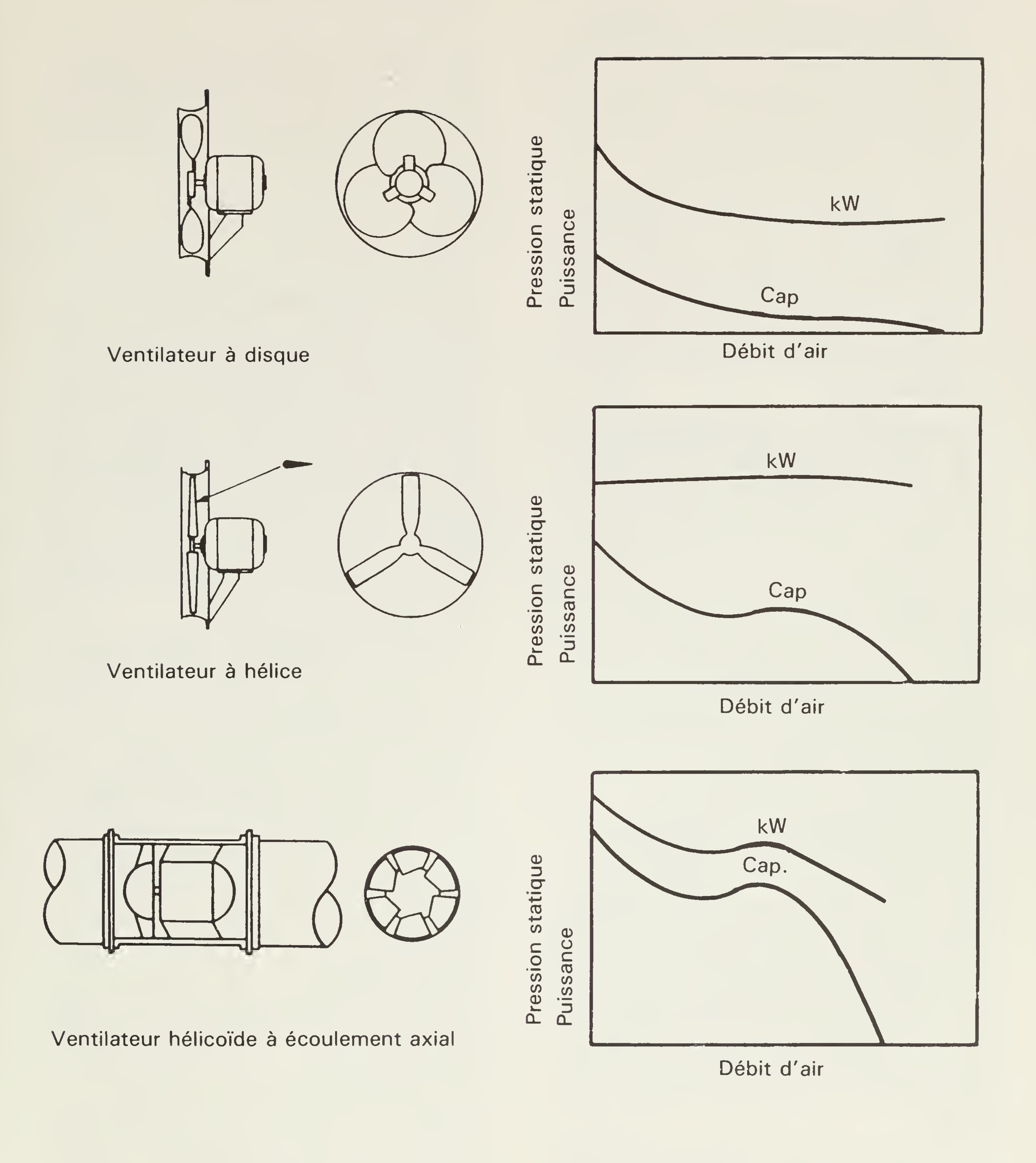


Fig. 9 Ventilateurs hélicoïdes à écoulement axial.
Source : Industrial ventilation, a manual of recommended practice.

Les ventilateurs hélicoïdes appartiennent généralement à l'une ou l'autre des catégories suivantes :

- Les ventilateurs à disque, qu'on utilise pour produire un courant d'air propre, sans résistance de conduits.
- Les ventilateurs à hélice, qu'on utilise pour produire un courant d'air sous faible pression statique (les ventilateurs d'aération de bâtiment, par exemple).
- Les ventilateurs hélicoïdes tubulaires, qu'on installe dans de courts tronçons de canalisations pour assurer le déplacement de l'air contenant des matières qui pourraient s'accumuler sur les pales. Choisir dans ce cas des ventilateurs de fort diamètre tournant à faible vitesse; les matières s'y accumulent en effet moins que sur les pales de petits ventilateurs tournant à grande vitesse.
- Les ventilateurs hélicoïdes à ailettes, qui sont puissants et de faible encombrement. Ils permettent d'atteindre des pressions plus importantes que les ventilateurs à hélice et sont offerts en modèles à roues multiples et ailettes à pas variables. N'utiliser les ventilateurs hélicoïdes à ailettes que pour déplacer de l'air propre.

3.9 *Ventilateurs centrifuges* Le ventilateur centrifuge consiste en une roue à aubes qui tourne dans une enveloppe en volute. La figure 10 présente les trois principaux types de ventilateurs centrifuges soit les ventilateurs à aubes courbes inclinées vers l'avant, les ventilateurs à aubes droites ou radiales et les ventilateurs à aubes inclinées vers l'arrière, et donne les courbes de rendement types de chacun.

Le ventilateur à aubes courbes inclinées vers l'avant est formé d'une roue qui comporte de nombreuses petites aubes et qui tourne dans une cage d'écureuil. Le bord d'attaque de chacune des aubes est courbé vers l'avant, dans le sens de la rotation de l'appareil. Ce ventilateur donne les meilleurs résultats à faible pression statique (moins de 1 kPa) et il fonctionne silencieusement. On l'utilise dans les systèmes de chauffage et de ventilation où la pression statique est faible ou modérée. Il se révèle également utile, notamment, dans les installations de séchage des grains où la pression de service demeure voisine de 0,75 kPa.

Le ventilateur à aubes courbes inclinées vers l'avant n'est pas adapté au déplacement d'air chargé de poussières ou de fumée. De même, il ne convient pas aux systèmes dans lesquels le débit d'air peut fluctuer sans que la pression de service varie sensiblement. Si la pression statique augmente, le ventilateur devient instable, son débit est irrégulier et il s'ensuit des variations de pression.

Le ventilateur à aubes droites ou radiales est le «costaud» de la manutention de matières; bien choisi, il convient à une foule d'applications. On l'utilise en particulier dans les systèmes où les matières traversent le ventilateur, ou lorsqu'on a besoin d'une pression élevée.

Le ventilateur à aubes droites ou radiales tourne à vitesse périphérique moyenne et il est moyennement bruyant. La roue comporte un ou deux bandages ou n'est pas bandée du tout; les aubes peuvent prendre diverses formes.

Dans le ventilateur à aubes inclinées vers l'arrière, les aubes sont inclinées dans le sens contraire de la rotation. Ce ventilateur tourne à grande vitesse périphérique; il fournit un bon rendement mécanique et résiste aux surcharges. Cette dernière caractéristique joue un rôle important dans les installations où les faibles fluctuations de la pression statique entraînent d'importantes variations du débit d'air. Dans la plupart des applications agricoles (ventilation exceptée), toutefois, il est peu probable qu'un ventilateur soit surchargé, dans la mesure où le système règle de lui-même le débit d'air.

N'utiliser les ventilateurs à aubes inclinées vers l'arrière qu'avec de l'air propre.

3.10 *Ventilateurs spéciaux* La figure 11 reproduit deux ventilateurs spéciaux couramment affectés à des applications agricoles :

- le ventilateur centrifuge à aubes à profil aérodynamique courbées vers l'arrière
- le ventilateur centrifuge à écoulement axial

Le ventilateur centrifuge à aubes à profil aérodynamique courbées vers l'arrière est en fait une version améliorée du ventilateur à aubes inclinées vers l'arrière. Les aubes de ce ventilateur de type spécial ont un profil aérodynamique qui rend l'appareil plus efficace et plus silencieux. Le ventilateur centrifuge à aubes à profil aérodynamique courbées vers l'arrière offre également l'avantage de donner un rendement égal dans toute l'étendue de son domaine d'utilisation.

Le ventilateur centrifuge à écoulement axial est essentiellement un ventilateur à aubes courbées vers l'arrière logé dans un carter qui est conçu pour être installé dans une canalisation. Côté encombrement, ses caractéristiques s'apparentent à celles du ventilateur hélicoide à ailettes.

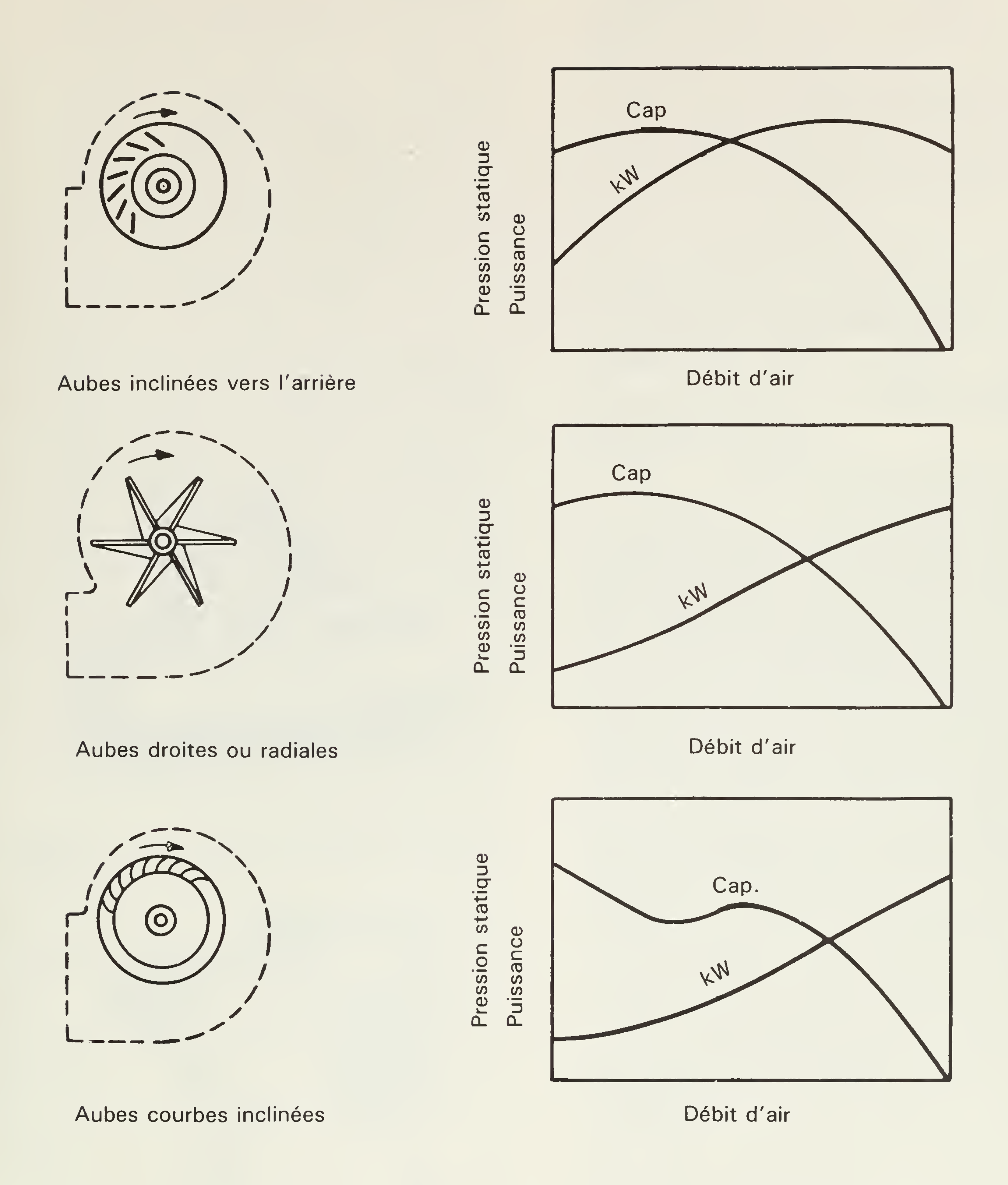
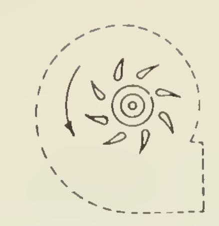
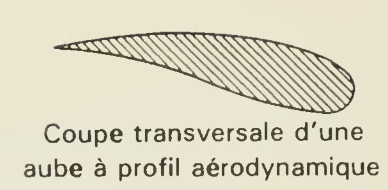


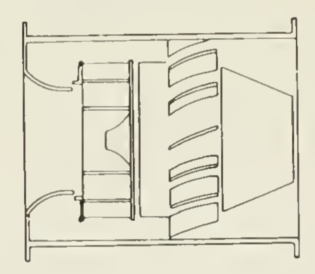
Fig. 10 Ventilateurs centrifuges.
Source : Industrial ventilation, a manual of recommended practice.





Coupe transversale d'une aube à profil aérodynamique

Aubes à profil aérodynamique courbées vers l'arrière



Ventilateur centrifuge à écoulement axial – roue centrifuge courbée vers l'arrière

Fig. 11 Ventilateurs centrifuges à aubes profilées et à écoulement axial.
Source : Industrial ventilation, a manual of recommended practice.

3.11 Soufflantes et compresseurs à déplacement positif

Les soufflantes et les compresseurs à déplacement positif se distinguent par leur pression de service. Les soufflantes sont des machines mono-étagées pouvant délivrer des pressions maximales de 100 kPa. Les compresseurs fournissent de faibles débits d'air, mais à pression élevée.

La soufflante à déplacement positif la plus couramment utilisée dans la manutention des produits est le surpresseur Roots à deux pales dont le mouvement est conjugé par engrenages de manière à former une chambre de volume variable (fig. 12). L'air est aspiré dans la chambre, comprimé et refoulé dans les conduits. Comme la tolérance de ces soufflantes n'est pas très élevée, l'air qui les alimente doit être bien filtré et débarrassé de ses poussières. L'air chargé de poussières réduit considérablement la durée de vie probable de ces machines. On doit également prévoir dans le réseau un limiteur de pression, pour le cas où un tuyau s'obstruerait.

D'autres soufflantes de conception analogue au surpresseur Roots ont des pressions peu élevées ou moyennes; ce sont la soufflante à pales multiples et la soufflante à pales filetées.

Il existe deux principaux types de compresseurs : le compresseur alternatif (à pistons) et le compresseur rotatif (fig. 13 et 14). La grande majorité des compresseurs utilisés dans le secteur agricole sont du type alternatif : ils sont simples, fiables et peu coûteux. Un compresseur mono-étagé à pistons de 0,75 kW fournit 1,8 L/s d'air à 700 kPa; une machine de 7,5 kW peut fournir 23 L/s d'air à 1 200 kPa.

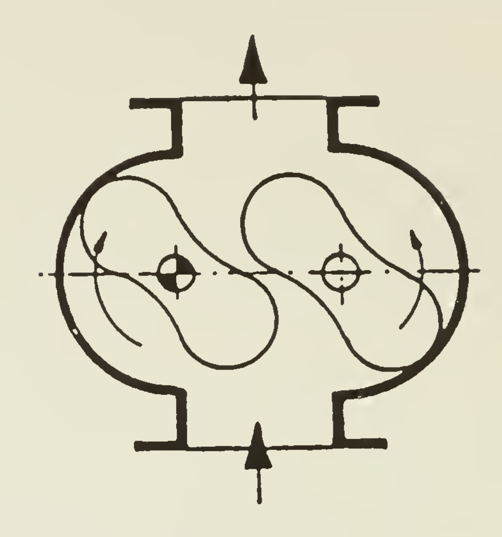


Fig. 12 Surpresseur de type Roots.

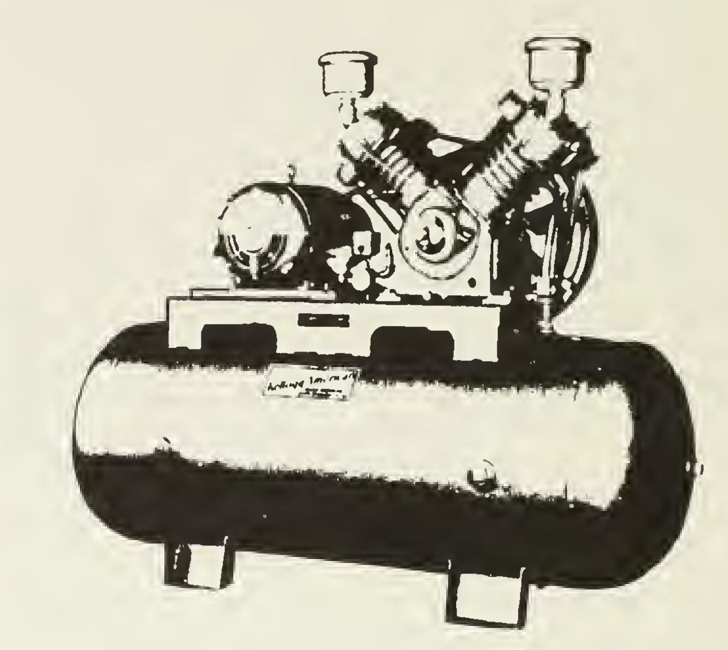


Fig. 13 Compresseur alternatif.
Source : Industrial catalogue : Air compressors.

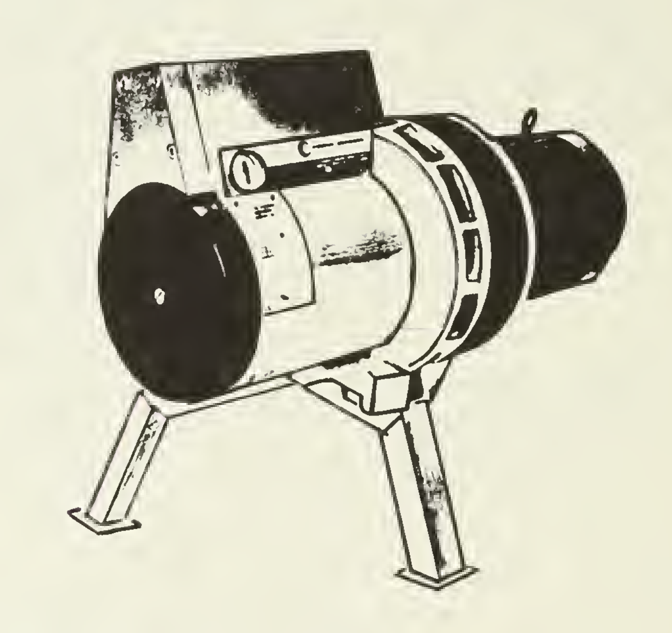


Fig. 14 Compresseur rotatif.
Source : Industrial catalogue : Air compressors.

Le tableau 2 présente le débit de divers compresseurs en service continu.

Il existe de nombreux modèles de compresseurs de toute taille. Choisir le moteur, le réservoir et les commandes en fonction de l'usage probable du compresseur dans tel ou tel type d'exploitation agricole. Tout compresseur devrait nécessairement comporter un contacteur manométrique commandant la marche et l'arrêt du compresseur, une soupape de sécurité, un manomètre, un clapet de purge du réservoir, un clapet antiretour, un filtre d'admission et un bouclier de sécurité.

Choisir un réservoir d'un volume inférieur à 200 L si la capacité de stockage ne joue pas un rôle important, si le compresseur est rarement ou peu sollicité par comparaison à sa capacité nominale, ou si la machine est équipée de commandes de débit constant. Utiliser un réservoir de plus de 200 L si l'installation nécessite d'importants débits de courte durée, si les variations de pression doivent être réduites au minimum et si le système doit être alimenté en air frais et sec. En général, et toutes proportions gardées, les compresseurs à petit réservoir sont moins coûteux que les autres.

La pression minimale d'utilisation de la plupart des compresseurs se situe autour de 700 kPa. Les systèmes industriels fonctionnent normalement à une pression de 550 à 700 kPa. Fixer la pression à 550–700 kPa sur les compresseurs à action intermittente, et à 550–600 kPa sur les machines à action continue. Ces pressions fournissent le meilleur rapport «débit/énergie consommée».

Utiliser des pressions de l'ordre de 850 kPa quand il y a forte consommation d'air en des points éloignés et pour accroître le volume d'air en réserve. En faisant passer la pression à plus de 700 kPa, on réduit légèrement le débit d'air.

Dans le secteur agricole, il est rare qu'on ait besoin de pressions de 1 000 à 1 200 kPa. Ces pressions se rencontrent le plus souvent dans les applications commerciales ou industrielles, par exemple les ateliers de réparation de véhicules.

Tableau 2 Débit de compresseurs en service continu

Intervalle de pression kPa	Débit L/s	Puissance, kW	
		Bi-étagés	Mono-étagés
550–1030	1,5–1,8		0,75
550–1030	1,9–2,7		1,10
550–1030	2,8–3,6		1,50
550–1030	3,7–4,8		2,20
550–690	6,3–9,4	3,7	
550–690	9,5–13,8	5,6	
550–690	13,8–18,9	7,5	
550–690	18,9–28,3	11,2	
550–690	28,4–37,8	14,9	

Note : Les débits sont ceux de compresseurs en service continu. En service intermittent, l'installation d'un réservoir d'une plus grande capacité autorise l'utilisation d'un compresseur moins puissant.
Source : *Industrial catalogue : Air compressors.*

4 TRANSPORTEURS PNEUMATIQUES

Le transporteur pneumatique se compose d'un ventilateur ou d'une soufflante produisant un flot d'air, d'un dispositif d'introduction du produit à transporter dans le flot d'air, de canalisations et d'un séparateur, qui sert à extraire les matières solides du flot d'air.

L'air transporte le produit jusqu'à destination; il fournit l'énergie grâce à laquelle le produit est amené de son état de repos à la vitesse requise. Une fois cette vitesse atteinte, le ventilateur ou la soufflante fournit l'énergie et le débit d'air voulus pour vaincre la résistance du réseau.

Bien conçus, les transporteurs pneumatiques offrent plusieurs avantages par rapport aux transporteurs mécaniques :

- ils sont autonettoyants;
- les canalisations peuvent atteindre les endroits difficiles (le nombre des coudes doit cependant être limité);
- leur entretien est peu coûteux (à moins qu'ils ne soient utilisés dans le transport de produits abrasifs);
- les problèmes occasionnés par les poussières sont minimes;
- on peut y intégrer des fonctions de refroidissement et de séchage.

Les transporteurs pneumatiques présentent toutefois des inconvénients :

- les produits friables peuvent être endommagés;
- les systèmes pneumatiques consomment plus d'énergie que d'autres systèmes de transport;

- ils ne conviennent pas au transport de produits de haut en bas;
- les canalisations doivent être horizontales ou verticales.

4.1 Types de transporteurs pneumatiques

Les transporteurs pneumatiques font appel soit à une dépression, soit à une surpression. Les systèmes à dépression fonctionnent à une pression inférieure à la pression atmosphérique; les systèmes à surpression fonctionnent à une pression supérieure à la pression atmosphérique. L'un et l'autre sont illustrés à la figure 15.

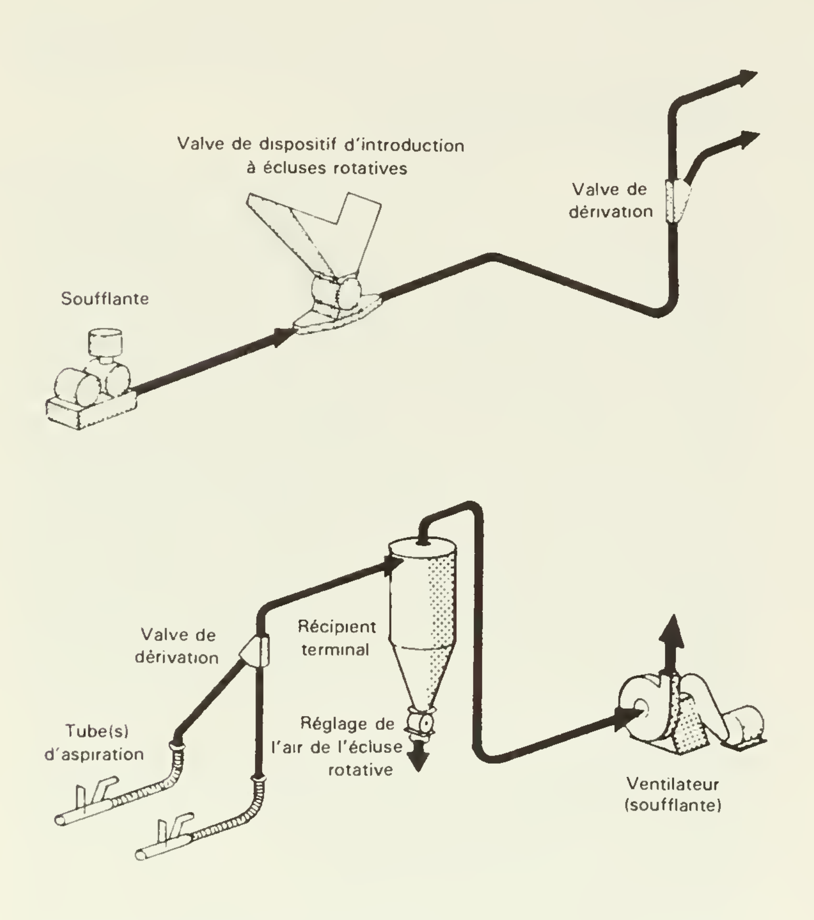


Fig. 15 Transporteurs pneumatiques à surpression et à dépression.
Source : Industrial catalogue, Muncy, Koppers Company, Inc.

Utiliser un système à dépression lorsqu'il y a plusieurs points d'introduction, mais un seul point de refoulement. À l'inverse, choisir un système à surpression s'il y a plusieurs points de refoulement, mais un seul point d'introduction.

Dans l'un et l'autre cas, c'est le débit d'air nécessaire au transport des produits qui détermine la puissance requise. Les caractéristiques du ventilateur ou de la soufflante sont fonction de la pression et du débit d'air requis.

Dans certaines installations, le transporteur pneumatique demeure stationnaire. Dans d'autres applications, il peut avoir à être déplacé en divers endroits. Les transporteurs pneumatiques mobiles sont généralement utilisés pour transporter un produit d'un point à un autre, pour décharger des grains d'une cellule dans un camion ou d'un wagon de chemin de fer dans une cellule ou un camion, par exemple.

Les transporteurs pneumatiques sont classés en fonction de leur pression de service. On en distingue quatre catégories :

- les systèmes à basse pression
- les systèmes à pression moyenne
- les systèmes à pression élevée
- les systèmes de fluidisation

4.2 *Systèmes à basse pression* Les transporteurs pneumatiques à basse pression fonctionnent à des pressions maximales de 5 kPa, avec un ratio «matières solides/air» de 1,0 et moins. Ils sont alimentés en air par un ventilateur centrifuge.

Le plus souvent, il s'agit de systèmes à dépression; ils se prêtent bien au transport de produits légers et secs comme la poussière, le son ou les aliments industriels pour animaux. Ces produits sont assez fins pour traverser le ventilateur sans risquer d'être endommagés.

Dans les systèmes à basse pression, ne pas tenir compte des matières solides en suspension si le ratio «matières solides/air» est inférieur à 0,2. (Le ratio «matières solides/air» équivaut au rapport entre le débit massique des produits transportés et le débit massique de l'air.)

À concentrations élevées, il doit être tenu compte de la présence de matières solides en suspension; en effet l'accélération des particules et le frottement des produits sur les parois des canalisations accroissent l'énergie requise par le système. On trouvera d'autres renseignements sur les liens entre la présence de particules en suspension et la conception d'un transporteur dans la section 4.13, «Capacité de transport», et la section 8, «Problèmes typiques».

4.3 *Systèmes à pression moyenne* Les systèmes à pression moyenne – surpression ou dépression – fonctionnent à des pressions de l'ordre de 5 à 35 kPa, avec des ratios «matières solides/air» de 1,0 à 6,0. L'alimentation en air est assurée par des soufflantes mono-étagées, poly-étagées ou à déplacement positif. La capacité des systèmes se situe généralement de 1 à 100 t/h. Les systèmes utilisés dans le déchargement des navires sont plus puissants encore.

Utiliser les transporteurs pneumatiques à pression moyenne – surpresssion ou dépression – pour transporter des granulés ou des bouchons sur de courtes distances, dans des canalisations de petit diamètre.

4.4 *Systèmes à pression élevée* Les systèmes à pression élevée fonctionnent à des pressions de l'ordre de 35 à 170 kPa; leur ratio «matières solides/air» peut atteindre une valeur de 30. À des ratios aussi élevés, les matières solides entraînent de l'air et ont tendance à se fluidiser.

Utiliser les systèmes à pression élevée pour transporter des granulés à des débits élevés, sur de longues distances.

4.5 *Systèmes de fluidisation* Les systèmes de fluidisation s'utilisent à faible vitesse d'écoulement d'air, avec des ratios «matières solides/air» pouvant atteindre une valeur de 300. On s'en sert pour transporter des matières solides en fines particules susceptibles d'entraîner de l'air (amidon, farine, chaux fine, par exemple). Les systèmes de fluidisation peuvent prendre la forme de transporteurs à réservoir de détente ou d'aéroglissières (Airslide, TM Fuller GATX, par exemple).

Dans un système à réservoir de détente, le produit est fluidisé par addition d'air, puis le réservoir est mis sous pression. On l'achemine ensuite par des canalisations vers le point de stockage. Utiliser les systèmes à réservoir de détente là où les produits à stocker doivent être élevés. Ils ne conviennent au transport horizontal que sur de courtes distances.

L'aéroglissière est constituée par un caisson faiblement incliné vers le bas. Une membrane faite de tissu ou d'un autre matériau poreux divise horizontalement le caisson en deux canaux. Le canal inférieur est porté à une pression de 6 à 30 kPa, ce qui amène les produits à se fluidiser et à s'écouler. Le débit d'air et la pression requis par les aéroglissières sont fonction des caractéristiques du produit transporté et de la vitesse d'écoulement désirée.

Ne pas utiliser les aéroglissières pour élever des produits. Les canalisations de ces systèmes sont installées en pente, dans le sens d'écoulement des produits transportés.

4.6 Dispositifs d'introduction

Dans les transporteurs pneumatiques, les dispositifs d'introduction servent à introduire les produits dans le système, puis à les séparer du flot d'air.

Dans les systèmes à basse pression, un tube suceur ou une pompe à vis introduit les produits dans le flot d'air. Il importe de voir à ce que la quantité d'air additionnel admise au point d'introduction suffise à maintenir le ratio «produits/air» à une valeur peu élevée. Si l'air additionnel est admis en quantité insuffisante, la conduite risque de s'obstruer.

Dans les systèmes à pression moyenne ou à pression élevée, les pressions en jeu sont suffisamment importantes pour justifier l'utilisation d'un dispositif d'introduction étanche à l'air. Les écluses rotatives conviennent généralement; les transporteurs à grande capacité (qui font appel à une dépression d'aspiration et une surpression de refoulement), toutefois, sont couramment équipés de prises d'air additionnel réglables.

4.7 Dispositifs d'introduction à écluses rotatives

Les dispositifs d'introduction à écluses rotatives (fig. 16) s'utilisent aussi bien dans les systèmes à surpression que les systèmes à dépression. Les écluses rotatives peuvent également agir comme joints étanches à l'air au point d'évacuation des récepteurs. La figure 17 présente un dispositif d'introduction à écluse rotative à passage direct.

Quand le transporteur est en marche, les produits arrivent au sommet de l'écluse, s'écoulent à travers les aubes le long de l'arbre horizontal et se déversent à la base de l'appareil. L'écoulement des produits se fait par gravité.

Trois facteurs déterminent la capacité de l'écluse :

- le déplacement volumétrique de l'écluse
- la vitesse de rotation du rotor
- l'aptitude des produits à pénétrer dans le rotor et à en sortir

Le déplacement volumétrique d'une écluse se calcule facilement. Multiplier le déplacement par la vitesse de rotation pour obtenir la capacité théorique de l'écluse.

L'aptitude d'un produit à pénétrer dans l'écluse et à en sortir est beaucoup moins facile à prévoir. Garder la force centrifuge exercée sur le produit à une valeur inférieure à celle de la force de gravitation pour que le produit tombe bien dans les alvéoles. Cette servitude limite généralement la vitesse de rotation des écluses à 20–60 r/min, compte tenu du diamètre du rotor, de l'aptitude du produit à s'écouler et de la durée de vie probable de l'appareil.

Les écarts de pression à l'intérieur même d'une écluse peuvent également contribuer à en réduire la capacité. Si l'écart mesuré dans le

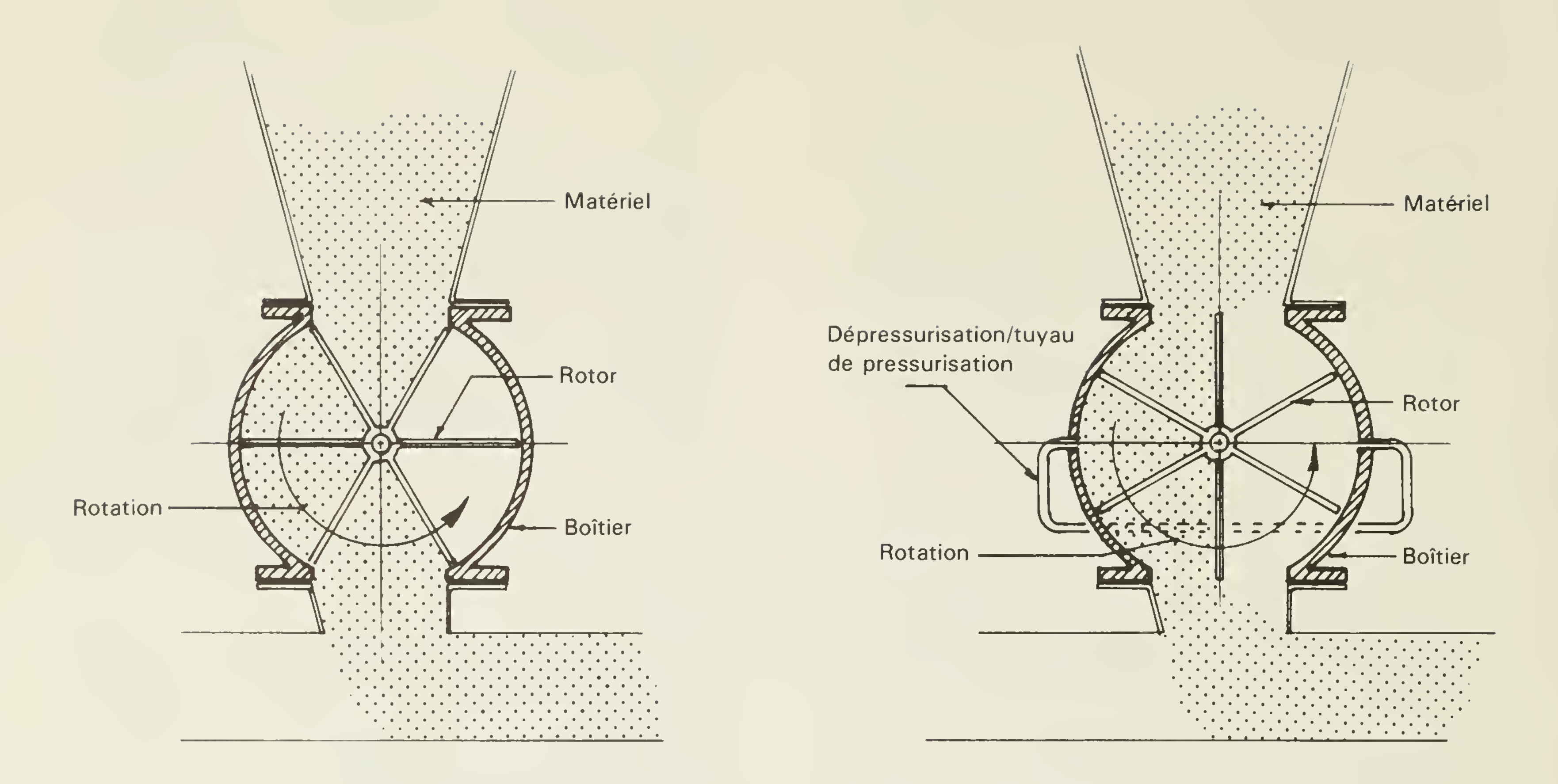


Fig. 16 Régulateur rotatif de débit d'air et dispositif d'introduction rotatif à haute pression.

sens d'écoulement du produit est positif, ses conséquences sont minimes ou nulles. Toutefois, si l'écart observé est négatif, trois facteurs peuvent contribuer à réduire la capacité de l'appareil :

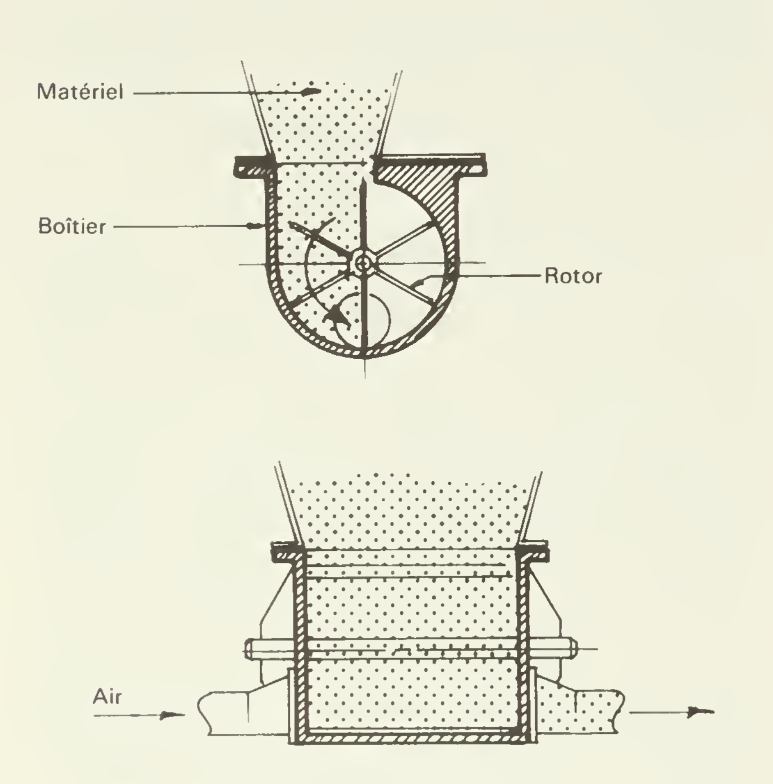


Fig. 17 Dispositif d'introduction à écluse rotative à passage direct.

- La mise en pression préalable des alvéoles. Côté alimentation, les alvéoles doivent être en mesure de se charger d'air avant que le produit ne puisse pénétrer dans l'écluse.
- Les fuites d'air à travers l'écluse, entre le côté refoulement et le côté alimentation. Ces fuites peuvent nuire à l'écoulement du produit dans l'écluse.
- La pression accumulée dans la conduite de transport. La pression accumulée dans la conduite de transport peut empêcher le produit de s'écouler entre les aubes.

Pour éviter la mise en pression préalable des alvéoles vides, on les garde à la pression atmosphérique en pratiquant des prises d'air dans le carter de l'appareil. Prévoir les prises d'air à l'endroit où l'alvéole est séparée de l'orifice d'alimentation et de l'orifice d'évacuation d'une distance égale à l'espace entre l'extrémité de deux aubes.

Pour réduire les fuites d'air, choisir un rotor ajusté avec précision ou régler le jeu entre l'extrémité des aubes et le carter; ce réglage ne peut se faire que sur les aubes à extrémité réglable ou flexible.

Pour corriger la mise sous pression de la conduite de transport, utiliser une écluse à passage direct ou mettre les alvéoles d'alimentation sous pression préalable en utilisant l'air libéré par les alvéoles vides.

La capacité d'une écluse rotative se trouve également réduite si les produits n'ont pas le

temps de s'écouler dans les alvéoles ou d'en ressortir. Ce facteur est intimement lié à la présence ou l'absence d'un flot d'air refoulé dans l'écluse et à l'effet de la force centrifuge, questions qui ont été examinées ci-dessus.

L'aptitude à l'écoulement du produit agit également sur la capacité du système. Les produits collants ou rugueux s'écoulent plus lentement que les produits granulaires secs. Par exemple, un système transportant des grains de blé lisses aura un meilleur débit qu'un autre transportant des grains d'orge rugueux, toutes choses étant égales par ailleurs (écluses de mêmes dimensions, vitesse et écarts de pression identiques).

Les écluses les plus répandues sont équipées de rotors à aubes à extrémité réglable ou flexible. Dans les deux systèmes, on prévoit généralement un jeu de 0,07 à 0,25 mm entre l'extrémité des aubes et le carter du rotor. Les machines à aubes à extrémité flexible absorbent environ trois fois plus d'énergie à –30 °C qu'à des températures plus élevées.

L'usure de l'extrémité des aubes est à l'origine de fuites d'air, en amont de l'écluse. Ce phénomène ne réduit pas uniquement la capacité de l'écluse; il compromet le bon fonctionnement de tout le système. L'utilisation d'aubes à extrémité réglable permet de réduire les fuites au minimum en atténuant le jeu entre le rotor et son carter. Si les écarts de pression de part et d'autre de l'écluse autorisent l'utilisation d'aubes à extrémité flexible, ces dernières préviennent mieux les fuites que les autres types d'aubes. Les aubes à extrémité flexible durent moins longtemps que les autres, mais cela ne pose que peu de problèmes dans la plupart des applications agricoles.

Au moment de concevoir un système d'alimentation, choisir le nombre d'aubes en fonction des applications. Le nombre d'aubes choisi doit être celui qui donnera le mélange air/produit le plus uniforme. Au moment de planifier un système dans lequel les produits d'un contenant sous pression doivent être déversés dans un contenant à pression atmosphérique, déterminer le nombre d'aubes en fonction du volume des fuites admissibles. Dans ce cas, c'est généralement le rotor à cinq ou six aubes qui donne les meilleurs résultats, quatre aubes étant toujours en contact avec le carter.

Les dispositifs d'introduction à pression moyenne nécessitent six ou, plus couramment, huit aubes pour assurer la ventilation et la mise sous pression des alvéoles.

Le volume des alvéoles de toute écluse est fonction du nombre d'aubes. Quand un produit est introduit en quantités importantes dans un flot d'air, la vitesse de l'air diminue rapidement, et la pression statique augmente. Ces variations se produisent chaque fois qu'une aube passe devant l'orifice de refoulement de l'écluse et elles peuvent être à l'origine de surpressions momentanées. Ces surpressions accroissent les besoins en énergie, diminuent la capacité du transporteur et occasionnent une usure prématurée de l'entraînement. Les surpresseurs de type Roots (cf. section 3.11) ont également tendance à produire des variations momentanées de pression. C'est pourquoi on les équipe généralement d'un réservoir-tampon lorsqu'on les utilise à proximité d'une écluse.

Les fabricants fournissent tous des données sur le déplacement volumétrique des rotors qui équipent leurs appareils. En guise d'exemple, nous reproduisons ci-dessous les données techniques d'une écluse rotative Sprout-Waldron de type 1.

Déplacement volumétrique typique

Écluse rotative Sprout-Waldron de type 1

Diamètre/longueur (mm/mm)

	200/150	250/200	360/250	400/360
Capacité (m^3/r)	0,003	0,008	0,020	0,037

Source : *Industrial catalogue*, Muncy, Koppers Company, Inc.

Choisir la capacité en fonction de 75 % du déplacement indiqué dans le tableau ci-dessus. Si le système ne doit nécessiter qu'un entretien minime, fixer le régime maximum à 30–40r/min. L'énergie absorbée par l'entraînement varie d'un fabricant à l'autre, mais elle est généralement de l'ordre de 0,2 à 1,2 kW. Si l'écart de pression de part et d'autre du dispositif d'introduction est élevé, les besoins en énergie augmentent, et le jeu entre le rotor et son carter doit être réduit.

4.8 *Exemples de calcul de régime d'écluse rotative* Calculer la vitesse à laquelle devrait tourner l'écluse rotative d'un dispositif d'introduction traitant un produit d'une densité de 800 kg/m^3 à raison de 50 t/h.

$$\text{Volume/min} = \frac{50}{0{,}80 \times 60} = 1{,}04\ m^3/\text{min}$$

Déplacement requis à 25 r/min

$$= \frac{1{,}04}{0{,}75 \times 25} = 0{,}056\ m^3/r$$

Déplacement d'une écluse 400/360 par tour

$= \quad 0{,}037\ m^3/r$

Vitesse corrigée de l'écluse :

$$= \frac{0{,}056 \times 25}{0{,}037}$$

$= \quad 38\ r/min$

4.9 *Pompes à vis* La pompe à vis (fig. 18) s'utilise pour amener un produit d'une cellule à une canalisation de transport. Dans ce cas, le produit comprimé assure l'étanchéité par rapport à l'atmosphère, mais la colonne de grains dans la trémie au-dessus de la pompe doit être suffisamment importante pour éviter les fuites d'air ou les débordements. Ce système convient particulièrement bien aux systèmes à basse pression.

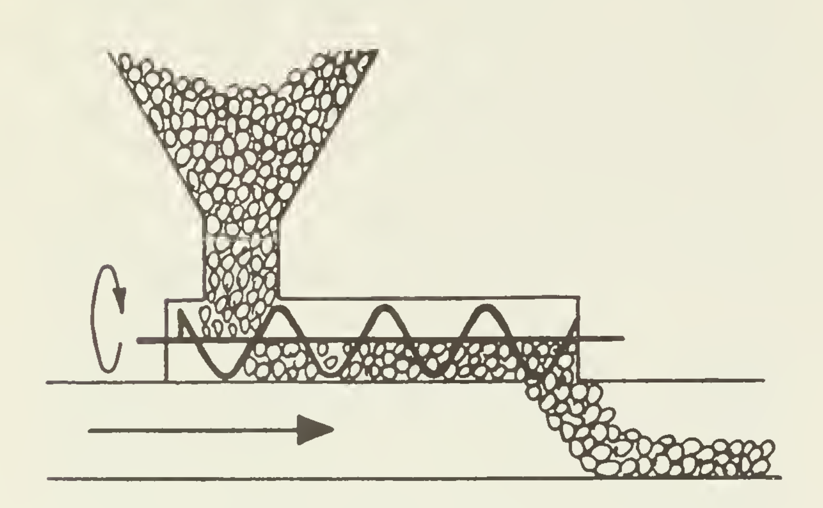


Fig. 18 Dispositif d'introduction à pompe à vis.

La pompe à vis déverse le produit qu'elle transporte directement dans la chambre de mélange du système.

4.10 *Dispositifs d'introduction à injecteur* Les dispositifs d'introduction à injecteur (fig. 19) ne trouvent que peu d'applications dans le secteur agricole. On les utilise surtout dans la mise en vitesse de particules d'une masse spécifique élevée. Malheureusement, la contre-pression qui se crée dans le tube venturi est à l'origine de débordements qui entraînent eux-mêmes une perte de contrôle du produit transporté.

4.11 *Dispositifs d'introduction à tube suceur* Les dispositifs d'introduction à tube suceur (fig. 20) peuvent eux-mêmes être alimentés par des systèmes à basse ou moyenne pression. L'air additionnel pénètre dans le système par une ouverture évasée ou par une double enveloppe. Au moment de concevoir un système à tube suceur, on envisagera la possibilité de régler l'admission d'air additionnel de manière à obtenir le meilleur débit possible.

Les dispositifs d'introduction à tube suceur peuvent s'utiliser avec un tuyau souple, à la manière d'un système d'aspiration, ou ils peuvent servir à décharger un bac conçu pour admettre de l'air dans un système pleinement chargé.

4.12 Facteurs de conception liés à la vitesse des particules et de l'air

La qualité de la conception d'un transporteur à basse pression dépend principalement de la vitesse de l'air. La vitesse de l'air est cependant difficile à déterminer dans la mesure où elle dépend des caractéristiques du produit transporté.

Les caractéristiques des produits dont il importe de tenir compte dans la conception d'un transporteur pneumatique sont les suivantes :

- l'aptitude à l'écoulement

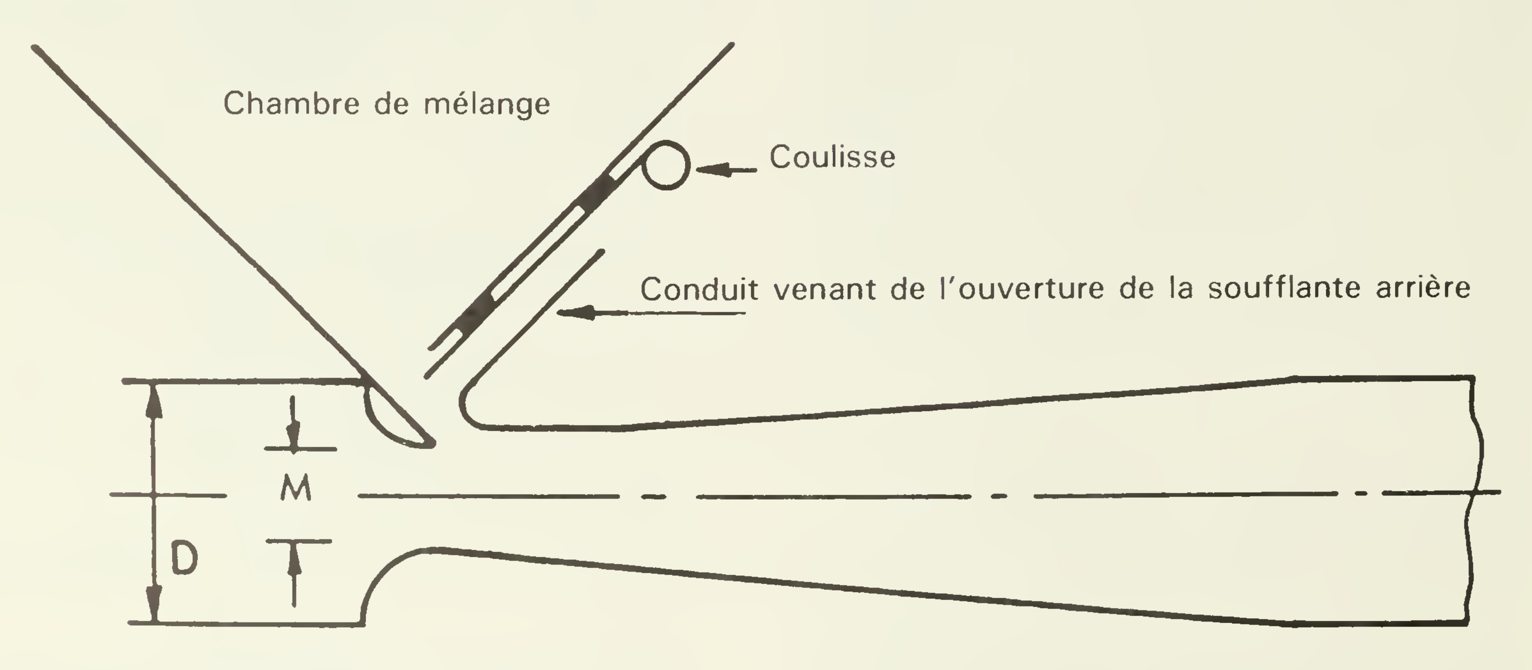


Fig. 19 Dispositif d'introduction à injecteur.

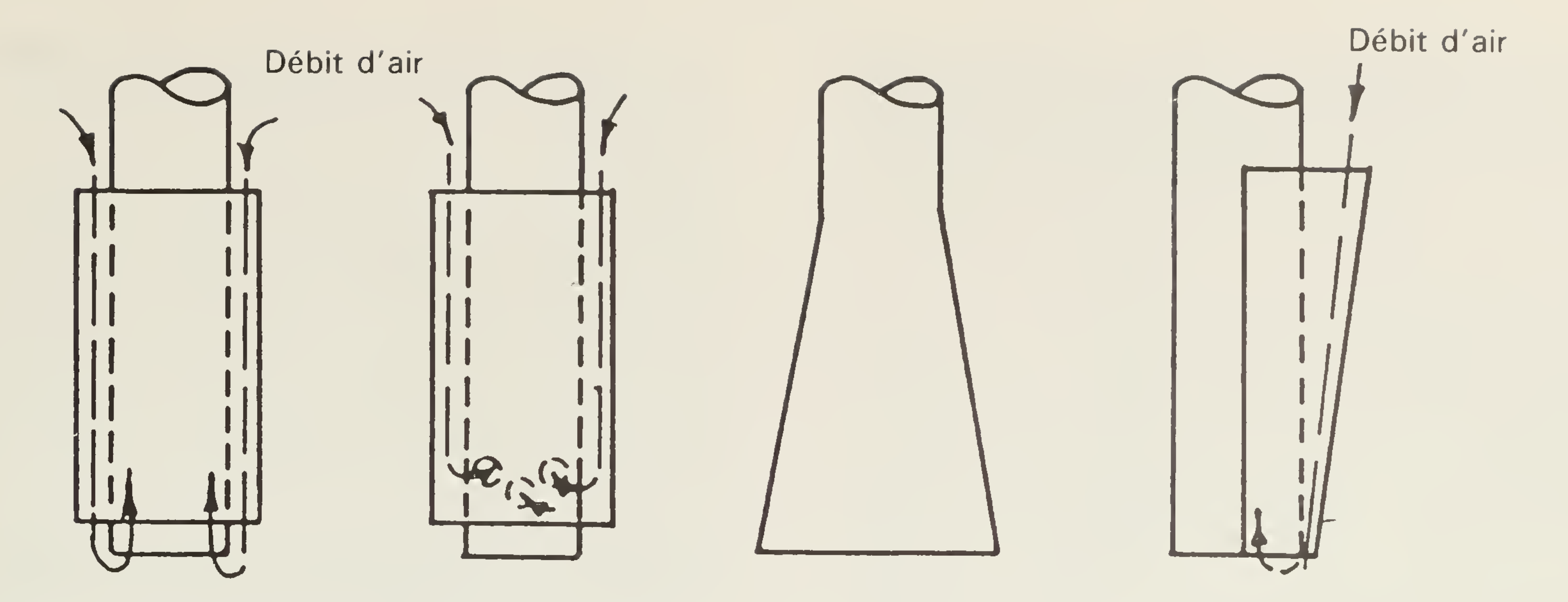


Fig. 20 Dispositifs d'introduction à tube suceur.

- la densité
- la forme et la taille des particules
- l'abrasivité
- la fragilité

L'aptitude d'un produit à l'écoulement est probablement la caractéristique qui exerce le plus d'influence sur la conception du matériel. Les produits granulaires et secs s'écoulent généralement bien, sans poser de problèmes. Les produits huileux ou collants, en revanche, peuvent s'accumuler sur les parois des conduits et obstruer des canalisations. Les transporteurs utilisés dans la manutention de ces produits demandent donc plus d'énergie. La teneur en humidité du produit transporté agit sur son aptitude à l'écoulement et sa cohésion.

Les produits qui s'écoulent librement et qui ont un poids volumétrique de l'ordre de 400 à 1 400 kg/m^3 ne posent habituellement pas de problèmes de transport. Le transport des produits plus denses demande une plus grande énergie. Les produits légers, de leur côté, supposent des dispositifs d'introduction plus importants.

Les particules sphériques d'un diamètre maximum de 10 mm se transportent généralement bien et elles n'imposent pas d'exigences spéciales. Même si le blé et le soja ont environ la même masse spécifique, le transport des grains de soja, plus gros, requiert une vitesse de 15 à 20 % supérieure à celui du blé.

Certains produits agricoles sont passablement abrasifs; c'est le cas, par exemple, de l'orge, du riz, du soja et des engrais granulés. Les systèmes utilisés dans le transport de ces produits absorbent plus d'énergie pour vaincre les frottements. De même, les produits abrasifs peuvent entraîner une usure excessive des composantes des systèmes utilisés pour les transporter.

Les transporteurs pneumatiques peuvent endommager certains produits agricoles. Cela est particulièrement vrai des semences et des graines oléagineuses. Les semoules et les produits moulus, par contre, ne souffrent que peu ou pas du transport. Bien conçus et bien choisis, les systèmes et le matériel de transport devraient endommager le moins possible les produits transportés.

4.13 Capacité de transport

La capacité d'un transporteur pneumatique ne tient pas uniquement à l'effet du débit et de la vitesse de l'air; elle dépend également de la régularité de l'introduction des produits dans le réseau. Les systèmes alimentés par intermittence ont une capacité moindre et sont plus exposés au bourrage.

Dans les systèmes à faible dépression, l'apport d'air additionnel au point d'aspiration des matières contribue à améliorer la capacité de transport du réseau. La quantité d'air additionnel utilisée est fonction du débit de l'appareil et du ratio «matières solides/air» requis. En abaissant le taux d'admission d'air additionnel, on augmente le taux d'aspiration des produits; il peut toutefois y avoir bourrage si le taux d'admission d'air additionnel est insuffisant. Malheureusement, il est presque impossible d'estimer avec précision à quels débits les bourrages se produisent. On trouvera au tableau 3 quelques vitesses de transport couramment utilisées.

En général, c'est la nature du produit et le ratio «matières solides/air» qui déterminent la vitesse de transport. Pour les produits non présentés au tableau 3, et à des densités de 400 à 1 400 kg/m^3, utiliser le tableau 4.

Tableau 3 Vitesses de transport typiques

Produit	Vitesse de l'air (m/s)
Fèves	20–25
Orge	20–33
Maïs	25–30
Graines de coton	20–30
Avoine	20–30
Sable (sec)	28–46
Sciure de bois	20–30
Copeaux	18–25
Blé	20–30
Laine	23–30

Tableau 4 Vitesse de l'air pour divers ratios «matières solides/air»

Ratio «matières solides/air»	Vitesse (m/s)
0,33–0,13	20
0,44–0,33	21
0,53–0,44	23
0,67–0,53	25
0,85–0,67	26
0,11–0,85	28

Source : *Reference data and tables. Bulletin RD-1.*

4.14 Séparateurs

Le séparateur assure la séparation du mélange air-matières solides. Plusieurs types de séparateurs sont aujourd'hui disponibles; deux sont abondamment affectés à des applications agricoles : le cyclone et le collecteur ou filtre de tissu.

4.15 *Cyclone* Le cyclone est un séparateur centrifuge. Épurateur d'air d'efficacité moyenne, il donne par contre de bons résultats avec des particules assez grosses. Le cyclone ne convient généralement pas à l'extraction des fines poussières (particules de moins de 50 μm); son efficacité varie néanmoins considérablement en fonction de la conception de l'appareil et de ses conditions d'entretien.

À leur entrée dans le cyclone, l'air et les matières solides sont animés d'un mouvement en spirale et chassés dans la chambre conique de l'appareil. Sous l'influence de la force centrifuge, les matières solides sont projetées contre la paroi extérieure du cyclone. Les matières solides sont recueillies à la base du cyclone, alors que l'air s'échappe par le sommet.

La diminution du diamètre du cyclone entraîne une augmentation de la vitesse de l'air, un accroissement de la perte de charge et une amélioration du pouvoir séparateur de l'appareil.

Le pouvoir séparateur d'un cyclone est fonction de la vitesse d'admission du mélange air-produits, du diamètre du cyclone et de la hauteur du cyclone. Les cyclones qui donnent le meilleur rendement sont les cyclones à vitesse d'admission élevée qui ont un faible diamètre et une grande hauteur. Ils déterminent également des pertes de charge importantes.

Dans les systèmes agricoles, il vaut mieux choisir des cyclones de fort diamètre à faible perte de charge (fig. 21).

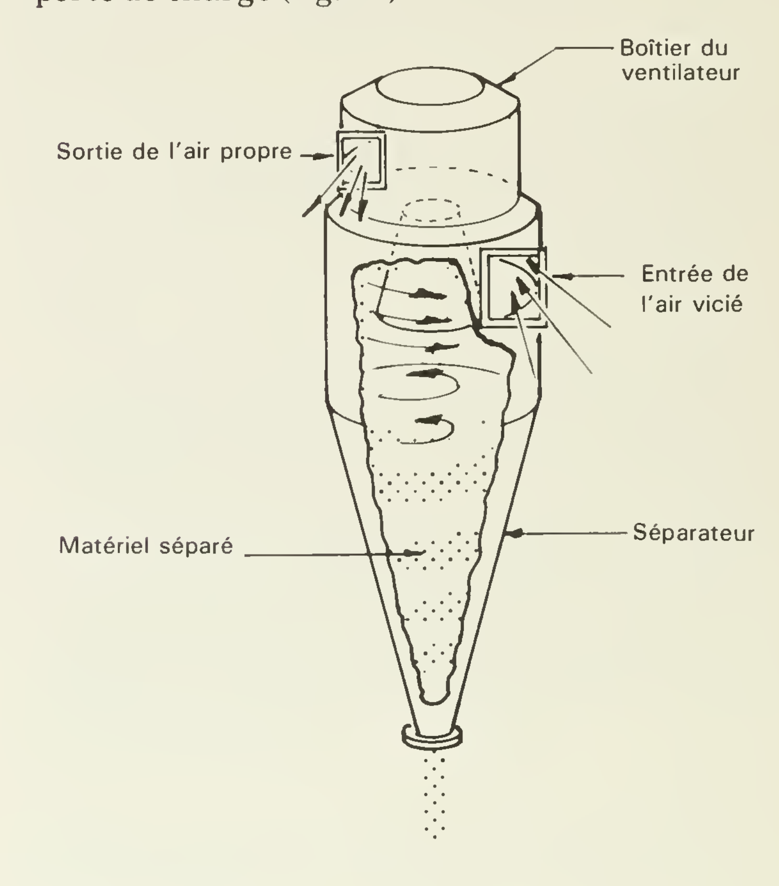


Fig. 21 Cyclone.

Si le système ne rejette que de l'air propre, utiliser un cyclone à grand rendement, c'est-à-dire un cyclone à vitesse d'admission élevée, faible diamètre et grande hauteur. Autrement, recourir à des filtres.

La perte de charge créée par un cyclone se situe de 2 à 5 fois la pression observée dans la conduite d'admission. Munir l'orifice d'évacuation des produits d'une vanne étanche à l'air. Donner un angle d'au moins 60 ° à la paroi de la trémie conique du cyclone pour éviter les accumulations de produits.

De nombreuses autorités réglementent aujourd'hui l'opacité de l'air rejeté à l'atmosphère par les cyclones. Cette situation entraîne l'utilisation de matériel de filtrage d'air propre à débarrasser l'air des fines particules de poussières de grains qu'il contient. Souvent, les particules de moins de

50 µm représentent plus de 50 % de la masse des poussières recueillies.

Au moment de concevoir un cyclone ou un système de filtrage, prévoir des trappes d'accès qui en rendront le nettoyage possible. Les systèmes sont tous exposés à des bourrages occasionnels, particulièrement quand ils sont utilisés dans la manutention d'aliments pour animaux. Les poussières qui contiennent de l'humidité ou des matières grasses sont particulièrement portées à s'accumuler sur les parois intérieures du cyclone et elles doivent être délogées. Le séparateur qui n'est pas nettoyé voit son efficacité diminuer et est davantage exposé aux pontages.

Pour assurer l'efficacité d'extraction des particules de l'air, maintenir le sens de rotation de l'air dans le cyclone en prévoyant un orifice d'évacuation tangentielle de l'air orienté dans le même sens que l'orifice d'admission. Voir à ce que les ventilateurs ne perturbent pas le sens de rotation de l'air dans le système.

La taille de la conduite d'alimentation d'un cyclone est fonction du débit d'air et de la nature des produits transportés. On trouvera à la figure 22 les dimensions standard pour des cyclones de fort diamètre. Les entreprises qui fabriquent des cyclones sont nombreuses. Pour obtenir de plus amples renseignements, consulter les documents qu'elles publient.

4.16 *Collecteurs à manches textiles* Les collecteurs à manches textiles s'utilisent pour débarrasser un flot d'air des fines particules qu'il contient. Ils sont constitués d'un corps muni à l'intérieur de manches ou de tubes filtrants.

Au fur et à mesure que l'air chargé d'impuretés ou de poussières traverse le tissu, les particules se déposent sur le tissu. L'air ainsi filtré est réutilisé ou rejeté dans l'atmosphère. Le rendement obtenu est souvent de l'ordre de 99 % pour des particules de 5 µm et plus.

Le nettoyage des collecteurs à manches se fait par vibration mécanique ou soufflage d'air propre à contre-courant.

La taille des collecteurs à manches textiles est fonction de deux facteurs : la quantité d'air traversant le tissu et la vitesse de filtration (ou ratio «débit d'air/surface du milieu filtrant») des matières transportées.

La vitesse de filtration peut varier de 15 (L/s)/m^2 dans le cas des filtres à nettoyage par vibration à 75 (L/s)/m^2 dans le cas des filtres à nettoyage par contre-courant, compte tenu de la nature des matières transportées. Les filtres à nettoyage par vibration ne se révèlent pas d'une très grande efficacité dans la plupart des applications agricoles. Utiliser plutôt des filtres à nettoyage par soufflage à contre-courant de jets d'air comprimé ou poussé par des ventilateurs à basse pression. La perte de charge déterminée par les filtres devrait être de l'ordre de 1,0 à 1,5 kPa.

L/S	A	B	C	D	E	F	G	H
700	190	50	200	610	50	400	300	760
1100	240	65	250	710	75	460	355	860
1300	250	75	300	760	100	510	380	910
1700	280	90	355	910	150	585	460	1170
2600	330	115	405	1070	150	635	530	1320
3400	330	150	460	1170	150	740	585	1420
4000	380	150	510	1270	250	890	710	1525
5500	430	190	610	1420	250	915	710	1575
7000	480	215	710	1625	250	1040	810	1625
9500	610	230	810	1830	300	1145	890	1830
12100	760	230	910	2030	300	1295	1015	2030
14200	840	255	1015	2235	300	1320	1120	2235

Dimension I – Télescopage des entrées pour l'ajustement

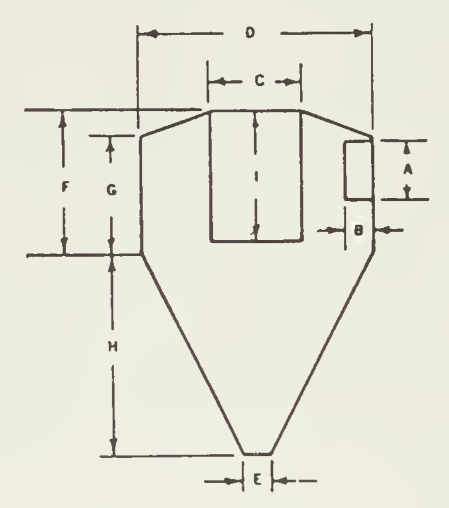


Fig. 22 Dimensions typiques de grands cyclones.

Pour obtenir plus de détails sur les caractéristiques et le choix des textiles à utiliser, consulter les fabricants.

4.17 Sécurité des transporteurs

Sauf dans les systèmes à basse pression, prévoir dans la conduite de transport une soupape de décompression ou une soupape casse-vide, le plus près possible de la soufflante. Fixer la pression de détente de 12 à 20 kPa au-dessus de la pression de service. La soufflante se trouvera ainsi protégée contre les dommages que pourrait causer un bourrage de la conduite.

L'utilisation d'une soufflante à déplacement positif requiert l'installation d'un filtre d'admission de bonne qualité. Vérifier le filtre périodiquement et le remplacer au besoin. La soufflante devrait être également équipée d'un assourdisseur; celui-ci joue un double rôle : il élimine les sautes de pression caractéristiques des surpresseurs Roots et il atténue le niveau de bruit de l'appareil.

Installer de préférence la soufflante dans un local inoccupé. Si cela n'est pas possible, la recouvrir d'une enceinte d'insonorisation. Dans l'un et l'autre cas, monter la soufflante sur des patins anti-vibrations.

Comme cela devrait toujours être le cas, les protège-courroies et les couvercles de protection doivent être en place quand l'appareil est en service.

5 SOUFFLEUSES DE FOURRAGES

Les souffleuses à roue à aubes sont couramment utilisées dans le transport ascendant de l'ensilage, du foin haché, des grains à teneur élevée en humidité, des semoules et d'autres produits; elles sont alimentées directement à la hauteur de l'ouie d'aspiration. Les produits quittent le carter de la roue à aubes à une vitesse voisine de la vitesse périphérique des aubes. Au départ, cette vitesse est supérieure à la vitesse de l'air, et l'air exerce un effet de ralentissement. Cependant au fur et à mesure que le produit s'élève dans la conduite, sa vitesse diminue et l'air lui communique l'énergie voulue pour l'amener à destination. Cela explique que l'ajout d'aubes à la roue d'une souffleuse a peu d'effet sur la vitesse des particules, même si le débit de l'air refoulé s'en trouve augmenté.

Le carter et la roue sont généralement concentriques, et le jeu entre les aubes de la roue et le carter, faible. Plus ce jeu est faible, meilleur est le rendement de la souffleuse. La fig. 23 présente les composantes d'une souffleuse de fourrages.

5.1 Besoins en énergie

Compte tenu de leur faible rendement, les souffleuses de fourrages absorbent une plus grande puissance que les convoyeurs mécaniques. La puissance réelle requise par une souffleuse de fourrages est fonction de la vitesse du ventilateur, de la nature des fourrages manutentionnés ainsi que du débit et de l'uniformité de l'alimentation. Comme les lois de rendement des ventilateurs le laissent supposer, la capacité d'une souffleuse de fourrages varie linéairement en fonction de sa vitesse, alors que la puissance requise par une souffleuse varie exponentiellement en fonction de sa vitesse. Pour obtenir un rendement optimal, il faut donc utiliser les souffleuses de fourrages à la vitesse la plus faible donnant la capacité et la hauteur d'élévation voulues.

La puissance moyenne absorbée par les souffleuses courantes est de l'ordre de 3 à 4,5 MJ/t dans le cas du maïs ou de l'ensilage et de 3 à 6 MJ/t dans le cas du foin.

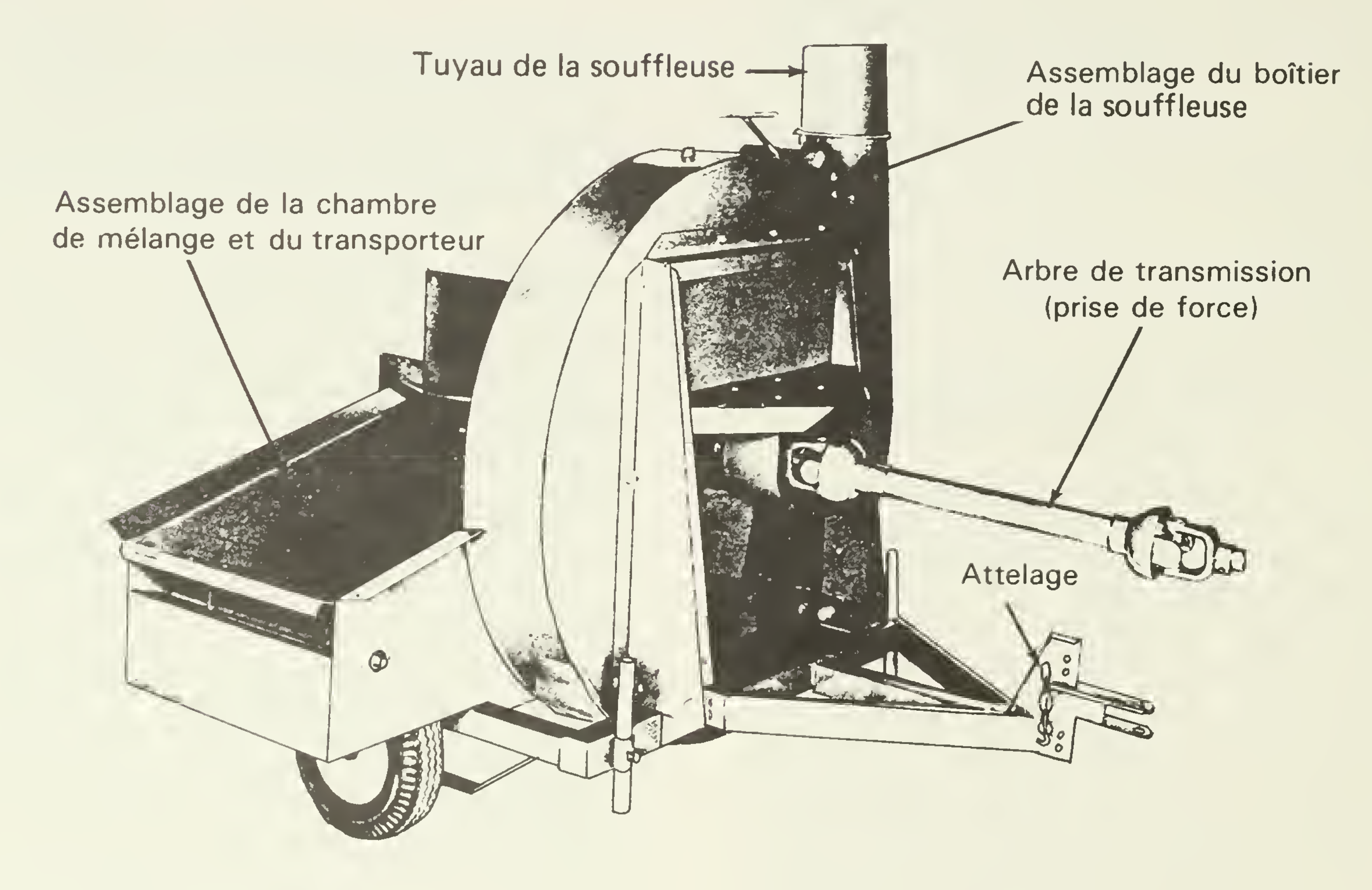


Fig. 23 Souffleuses de fourrages.
Source: Evaluation report : John Deere 6500 forage blower.

Le taux de rendement des souffleuses concentriques à aubes radiales n'est généralement que de l'ordre de 25 à 30 %. La chose tient généralement à l'existence de mouvements indésirables des particules, principalement quand les particules ne quittent pas la roue avant d'atteindre le point limite de chute. Pour obtenir un rendement optimal, régler la position de l'orifice d'alimentation et le débit d'alimentation de manière que les produits glissent sur les aubes et pénètrent dans la conduite de refoulement en entrant le moins possible en contact avec la volute. Les matières solides devraient toutes avoir quitté les aubes de la roue avant d'atteindre le point limite de chute. Dans les faits, toutefois, ces conditions s'obtiennent difficilement.

5.2 Capacité des souffleuses de fourrages

La hauteur théorique à laquelle un produit peut être élevé s'écrit :

$$H = V^2/2g$$

où H = hauteur d'élévation (m)

V = vitesse périphérique (m/s)

g = accélération due à la gravité (m/s^2)

Dans les faits, toutefois, les frottements qui s'exercent dans la conduite de refoulement et l'énergie requise pour faire circuler les produits dans la goulotte d'évacuation font que les hauteurs atteintes sont bien inférieures aux valeurs théoriques.

Des expériences ont montré que la hauteur d'élévation effective des souffleuses se situe de 40 à 50 % des valeurs théoriques. Pour calculer la hauteur d'élévation effective d'un conduit d'un diamètre maximal de 250 mm, utiliser l'équation suivante :

$$H = \frac{3{,}1\, v^2}{g W^{0{,}33}}$$

où W = capacité de la souffleuse (kg/h)

Cette équation vaut pour les capacités de 5,5 t/h et moins; elle tient compte du coude placé au sommet de la conduite, à l'endroit où les produits pénètrent dans le silo.

Dans les faits, la capacité des souffleuses varie considérablement. L'évaluation qui a été faite de deux souffleuses de fourrages par le Prairie Agricultural Machinery Institute (PAMI) ont donné les résultats suivants. Dans le transport de maïs à teneur en humidité de 60 %, les capacités se situaient de 20 à 27 t/h. Dans le cas du trèfle à teneur en humidité de 32 %, les capacités se situaient de 25 à 33 t/h. Le maïs et le trèfle ont été élevés d'une hauteur de 25 m. Le régime mesuré à la prise de force était de 540 tr/min. Un tracteur de 40 kW suffisait à actionner les souffleuses. Le PAMI a également observé que l'énergie était utilisée au mieux quaLe mais et le trèfle ont été élevés d'une hauteur de 25 m. Le régime mesuré à la prise de force était de 540 tr/min. Un tracteur de 40 kW suffisait à actionner les souffleuses. Le PAMI a également observé que l'énergie était utilisée au mieux quand le débit des produits était porté à sa valeur maximale.

En règle générale, la capacité d'une souffleuse de fourrages devrait être fixée à deux fois celle de la récolteuse. La souffleuse est ainsi en mesure de soutenir, voire de dépasser, le rythme des opérations de récolte et de transport.

Si la vitesse périphérique de la souffleuse est insuffisante, un bourrage se produit. En revanche, la souffleuse utilisée à un régime excessif consomme inutilement de l'énergie.

Plusieurs systèmes peuvent être utilisés pour alimenter la souffleuse en fourrages : transporteurs à vis, à bande, à chaîne ou à secousses, suceuses, etc. Les dispositifs d'alimentation sont offerts en longueurs de 0,5 à 3,7 m. Les souffleuses de fourrages sont généralement entraînées par la prise de force d'un tracteur, à 540 ou 1 000 tr/min.

5.3 Souffleuses à roue à aubes de produits granulaires

Les souffleuses à roue à aubes utilisées dans la manutention des grains peuvent prendre la forme de souffleuses de fourrages tournant à vitesse réduite ou de souffleuses à roue à aubes conçues pour assurer le transport des grains en conduite verticale.

Les souffleuses de fourrages transportent les grains à la manière de l'ensilage. Comme les grains peuvent être gravement endommagés, les souffleuses de fourrages ne conviennent pas à la manutention des semences ou des grains commerciaux. Elles se révèlent cependant utiles dans la manutention des céréales et des semoules fourragères.

Les souffleuses à roue à aubes utilisées dans la manutention des produits granulaires sont plus petites que les souffleuses de fourrages et elles tournent à plus grande vitesse. Les produits sont généralement introduits dans l'ouie de la roue à aubes; en évitant ainsi qu'ils ne heurtent les aubes, on en atténue la détérioration.

5.4 Recommandations d'utilisation

Suivre les recommandations ci-dessous pour optimiser le rendement des souffleuses et assurer la sécurité des opérateurs.

- Utiliser des coudes résistants et d'un grand rayon de courbure; placer les coudes le plus près possible de l'orifice d'évacuation du réseau. Cette configuration contribue à réduire les frottements et l'énergie requise.
- Positionner les conduits le plus verticalement possible; éviter les renfoncements.
- Prévoir un espace de 200 à 250 mm entre la base de l'orifice de refoulement du réseau et le sommet du silo. Cette configuration prévient les contre-pressions susceptibles d'occasionner des bourrages.
- Pour obtenir le meilleur rendement possible, utiliser le conduit de plus fort diamètre et les plus gros accessoires convenant à la souffleuse.
- Faire pénétrer de l'eau dans une souffleuse en marche par l'orifice d'admission d'eau pour dissoudre les dépôts gommeux laissés par un ensilage collant. Vérifier le ventilateur entre les chargements et régler le débit d'eau en fonction des besoins.
- Voir à ce que les souffleuses en service soient bien stables et de niveau.

6 LIMITATION DES DÉTÉRIORATIONS SUBIES PAR LES PRODUITS TRANSPORTÉS

Rares sont les mesures qui peuvent être prises pour atténuer les détériorations subies par les grains ou les granulés transportés pneumatiquement. Les particules de matières moulues présentent un ratio «surface/poids» élevé qui en rend le transport assez facile et peu dommageable. Les grains, en revanche, peuvent être endommagés dans une proportion de 3 à 4 % au cours d'une seule manutention dans un transporteur pneumatique. De façon générale, on pourra réduire le volume des détériorations, l'usure du système et les besoins en énergie en suivant les recommandations suivantes.

- Concevoir le réseau de manière à restreindre le plus possible le nombre des changements de direction. Les coudes constituent les principaux points d'usure, particulièrement à proximité de l'extrados.
- Utiliser des coudes d'une seule pièce, formés à froid et à grand rayon de courbure. Si les conduits sont trop légers pour être laminés à froid — ce qui est le cas, par exemple, des conduits de poussières — utiliser au moins 7 segments pour former un coude de 90 °. Le rayon des coudes des conduits de poussières doit être égal ou supérieur à 2,5 *D* (*D* = diamètre de la conduite). Dans les transporteurs de produits moulus, utiliser des coudes dont le rayon de courbure est d'au moins 5 *D*. Enfin, prévoir des coudes laminés d'un rayon de courbure égal à 10 D dans le transport des grains ou des granulés.
- Éviter d'utiliser des dispositifs d'introduction à écluse rotative dans la manutention des granulés.
- Utiliser la plus faible vitesse de transport donnant au transporteur un rendement continu et fiable.
- Garnir d'un matériau résistant à l'abrasion les coudes soumis à une forte usure. Les principaux matériaux anti-abrasion comprennent la céramique, l'acier à haute teneur en carbone et le polyéthylène à très haute densité.
- Certains produits particulièrement abrasifs déterminent une usure rapide des transporteurs pneumatiques. Ce sont notamment les pois, le soja, le lin et le maïs. Dans le cas des pois et du soja, notamment, les saletés entraînées expliquent souvent la majeure partie de l'usure.
- Certains produits sont particulièrement sensibles à l'abrasion et ont une faible résistance aux chocs. C'est le cas, notamment, des graines de dicotylédones comme les pois et les fèves, des semences — dont le taux de germination peut se ressentir de détériorations mineures — et des grains mal séchés, qui peuvent contenir des grains cassés ou des grains dont l'enveloppe a durci.

7 LUTTE ANTIPOUSSIÈRE

La lutte antipoussière joue un rôle essentiel dans les installations où sont manutentionnés des produits agricoles. Les poussières constituent en effet un danger pour la santé et elles présentent des risques d'incendie ou d'explosion.

Dans le transport des grains, le frottement des grains entre eux et le frottement entre les grains et les parois des contenants créent de la poussière. Cette poussière est une substance organique très fine, à pouvoir calorifique élevé. Plus la proportion des poussières en suspension dans l'air augmente, plus le risque d'explosion s'accroît. De même, les recherches ont montré que les poussières de grains peuvent être à l'origine de graves troubles respiratoires.

La lutte antipoussière comporte deux aspects : l'élimination des sources d'émission de

poussières dans l'atmosphère et le dépoussiérage.

7.1 Élimination des sources de création et d'émission de poussières

Les coûts de construction et d'utilisation des systèmes de dépoussiérage sont extrêmement élevés, particulièrement dans la mesure où les systèmes ne créent pas de revenus. De plus, le coût annuel d'entretien des systèmes de dépoussiérage peut atteindre 4 % de leur valeur de remplacement, et l'ajout d'un système de dépoussiérage à une installation contribue souvent à doubler la consommation d'énergie et les frais afférents.

Par leur conception, les systèmes de transport peuvent contribuer sensiblement à réduire la nécessité d'un système de dépoussiérage spécial. La réduction des frottements des grains joue à cet égard un rôle particulièrement important et elle se contrôle facilement dans les réseaux à écoulement non turbulent. Il est également possible de réduire le frottement des grains transportés en prenant les mesures suivantes.

- Utiliser des transporteurs à chaîne ou à bande de préférence à des transporteurs à vis.
- Réduire la pente et la longueur des goulottes de manière à y ralentir la vitesse d'écoulement des céréales. Cette solution réduit l'usure des goulottes, la détérioration des grains et la formation de poussières, aussi bien dans la goulotte qu'aux points de changement de direction (à l'endroit où les grains tombent dans une trémie ou sur un autre transporteur, par exemple).
- Utiliser des goulottes à extrados réduisant l'abrasion et munies de ralentisseurs d'écoulement.
- Réduire la profondeur des silos ou cellules de manière à atténuer l'impact des produits au moment du remplissage. La hauteur de chute de plus de la moitié des grains stockés dans un silo est égale à au moins la moitié de la profondeur du silo.
- Réduire la turbulence des grains qui circulent dans les tronçons de raccordement utilisés pour mettre en communication les diverses composantes du matériel de manutention et de stockage. Bien çoncus, les éléments de raccordement servent plus à contraindre l'écoulement naturel du produit qu'à le rediriger; ils créent ainsi beaucoup moins de poussières et requièrent beaucoup moins d'entretien.
- Utiliser des dispositifs d'élimination des bourrages et de régulation du débit pour éviter la mise en suspension dans l'air des poussières transportées. Cette solution peut nécessiter l'utilisation de plusieurs petites trémies tampons, mais elle élimine la création et l'émission de poussières. Les appareils modernes de régulation automatique de débit peuvent se révéler utiles dans ce domaine.
- Utiliser des transporteurs de fort diamètre et à vitesse lente pour atténuer la turbulence et l'effet abrasif des produits, tant à leur point d'introduction dans le système qu'à leur point de refoulement. En plus de restreindre l'émission de poussières, ces transporteurs durent plus longtemps et nécessitent moins d'entretien.

En portant attention à un certain nombre de procédures d'utilisation, on pourra également restreindre l'émission dans l'air ambiant des poussières créées par la manutention des produits.

- Sceller les tronçons de raccordement de manière à éviter les fuites de poussières.
- Rapiécer ou retourner les goulottes usées pour en prolonger la vie utile.
- Sceller les éléments de raccordement des goulottes.
- Calfeutrer les raccordements à bague fendue et en vérifier régulièrement l'étanchéité.
- Nettoyer fréquemment le sol et les surfaces où les poussières s'accumulent. Cette simple opération contribue à réduire la réintroduction de poussières dans l'air sous l'effet des courants d'air.
- Réduire la surface utile des ouvertures de manière à garder les poussières dans les trémies et les tronçons de raccordement.
- Équiper les silos de réception de grilles à fermeture par gravité automatique. Ces grilles restreignent efficacement l'échappement des poussières émises dans un silo en cours de remplissage. Même si elles sont coûteuses, elles contribuent également à réduire le débit d'air requis pour garder les produits traversant la grille à une vitesse suffisante pour empêcher l'émission de poussières.

Il ne s'agit là que de quelques exemples de mesures propres à réduire les concentrations de poussières dans les installations de manutention des grains. Ces mesures ne peuvent pas toutes être prises dans les installations actuelles; toutes, cependant, sont extrêmement rentables si on les compare aux coûts des systèmes de dépoussiérage et aux dangers pour la santé que peut présenter la présence de poussières dans l'air.

7.2 Systèmes de dépoussiérage

Il existe de très intéressants ouvrages sur la conception de systèmes de dépoussiérage. On aura intérêt à consulter des publications comme *Design of Industrial Exhaust Systems* (Alden and Kane Industrial Press), *Industrial Ventilation* (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) et *ASHRAE Handbook* (American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers).

Le concept de la vitesse d'extraction joue un rôle important dans la conception des systèmes de dépoussiérage. Il sert à déterminer la vitesse de l'air requise pour éviter que des particules de poussière ne s'échappent par une ouverture. Dans le cas de grains, la vitesse d'extraction est de l'ordre de 1,0 à 1,5 m/s, au-dessus d'un espace ouvert. Il faut doubler ces valeurs s'il y a de très forts courants d'air latéraux.

Le tableau 5 présente un guide des débits d'air à utiliser dans le dépoussiérage de diverses composantes de matériel de manutention ou de traitement de produits. Le débit d'air peut varier considérablement compte tenu du degré d'étanchéité, du débit des matières et de la tendance des grains à entraîner la formation de poussières.

Tableau 5 Débit d'air nécessaire au dépoussiérage

Éléments	Débit d'air
Silos	260 L/s par silo
Élévateurs à godets	510 L/s par m^2 de section transversale
Fosses	1 020 L/s par m^2 de surface exposée
Mélangeurs	
0,5 t	140 L/s
1,5 t	320 L/s
Plus de 1,5 t	450 L/s
Épurateurs	150 à 200 L/s par m^2 de surface d'épuration
Balances	
200 L	135 L/s
350 L	190 L/s
400 L	290 L/s
Transporteurs à vis	95 L/s (canalisations de 10 m de circonférence extérieure)

Source : *Industrial ventilation, a manual of recommended practice.*

Dans tout système de dépoussiérage, cependant, la vitesse minimale de l'air devrait être de 18 m/s.

8 PROBLÈMES TYPIQUES

La solution des problèmes posés par les systèmes de ventilation et les transporteurs pneumatiques à basse pression fait intervenir de nombreux facteurs.

Déterminer tout d'abord les contraintes d'utilisation du système, et notamment :

- les volumes d'air requis
- la capacité de transport requise
- la vitesse d'écoulement
- la disposition et l'emplacement des composantes du système
- les caractéristiques des produits transportés
- les conditions atmosphériques ambiantes

Utiliser ces renseignements pour calculer l'énergie nécessaire au déplacement de l'air propre et des matières à transporter, puis pour déterminer la taille des diverses composantes du système.

Tant pour l'air propre que pour les matières transportées, les pertes de charge sont liées aux facteurs suivants :

- pertes d'introduction
- pertes de mise en vitesse
- pertes dans les tronçons droits
- pertes dans les coudes
- pertes dans les appareils de réception
- pertes de charge totales du système

8.1 Pertes d'introduction (H_e)

$$H_e = F \times P_v$$

où F = facteur de perte d'introduction (cf. appendice 1)

P_v = pression dynamique (Pa)

8.2 Pertes de mise en vitesse (H_a)

Pour l'air propre :

$$H_a = P_v$$

Pour les matières transportées :

$$H_a = 2{,}25 \times R_w \times P_v$$

où 2,25 = facteur de conception établi par la MikroPul Corporation

R_w = ratio «débit – masse des matières solides/débit – masse de l'air»

8.3 Pertes dans les tronçons droits (H_p)

Pour l'air propre :

$$H_p = L_e \times F_l$$

Pour les matières transportées :

$$H_p = F_m/F_a \times F_l \times L_e$$

où L_e = longueur équivalente de conduit (m)

F_l = perte par frottement (Pa/m)

F_m = perte par frottement du mélange

F_a = perte par frottement de l'air

Au moment de calculer la longueur d'un transporteur pneumatique à basse pression, ajouter 15 à 20 % à la longueur des conduits verticaux.

8.4 Pertes dans les coudes (H_b)

Pour l'air propre :

H_b = longueur équivalente de conduits droits (cf. appendice 2)

Pour les produits transportés :

$$H_b = N \times [1 + 2(F_m/F_a) - 1)] \times F_b \times P_v$$

où N = nombre de coudes

F_b = fraction de la pression dynamique (cf. appendice 2)

8.5 Pertes dans les appareils de réception (H_c)

La perte dans les appareils de réception est fonction de la nature des récepteurs. Dans la plupart des cas, on pourra estimer la perte en multipliant la pression dynamique par un facteur de 2 à 4. Dans le cas des récepteurs ou des filtres à manches textiles, toutefois, il faut consulter les données des fabricants.

Pour les pertes en aval du récepteur, fonder les calculs sur le facteur de perte de l'air propre et y ajouter l'effet des chapeaux protecteurs, des assourdisseurs, des indicateurs de débit et des éléments similaires.

Assimiler les systèmes équipés d'accessoires de conditionnement de l'air (appareils de chauffage, refroidisseurs, déshumidificateurs, etc.) à des systèmes à air propre.

8.6 Pertes de charge totales du système

La perte de charge totale du système est égale à la somme de chacune des pertes, de l'orifice d'admission à l'orifice de refoulement. Ce paramètre s'applique aussi bien à l'air propre qu'aux produits transportés.

8.7 Exemples de calcul relatif à des systèmes de dépoussiérage

Considérons un système simple de dépoussiérage d'une fosse de 1 m × 3 m (fig. 24). Comme les systèmes de dépoussiérage ne transportent essentiellement que de l'air propre, on ne tient pas compte de la masse du flot d'air et des matières qu'il contient.

Pour calculer le débit d'air à extraire (Q), on utilise les données du tableau 5.

$$Q = 1\ \text{m} \times 3\ \text{m} \times 1020\ (\text{L/s})/\text{m}^2$$
$$= 3060\ \text{L/s}$$

La figure 7 présente des données sur les pertes par frottement de conduits de divers diamètres, pour diverses vitesses. À une vitesse de 20 m/s, la perte par frottement dans un conduit de 500 mm de diamètre s'élève à 8 Pa/m.

Dans ce cas :

$$P_v = (v/1{,}29)^2$$
$$= 240\ \text{Pa}$$

où P_v = pression dynamique (Pa)

D'après l'appendice 1, le coefficient moyen d'introduction (C_e) des produits dans un silo à chapeau conique est de 0,90.

Pour calculer la perte d'introduction (H_e), on utilise la formule :

$$H_e = \frac{1 - Ce^2 \times P_v}{Ce^2}$$

$$= \frac{1 - 0{,}90^2 \times 240}{0{,}90^2}$$

$$= 56\ \text{Pa}$$

D'après l'appendice 2, la longueur de conduit droit équivalente à deux coudes est égale à :

$$2 \times 9{,}2 = 18{,}4\ \text{m}$$

La perte de charge d'un dépoussiéreur à filtre est de 1 500 Pa (cf. section 4.16, «Collecteurs à manches textiles».

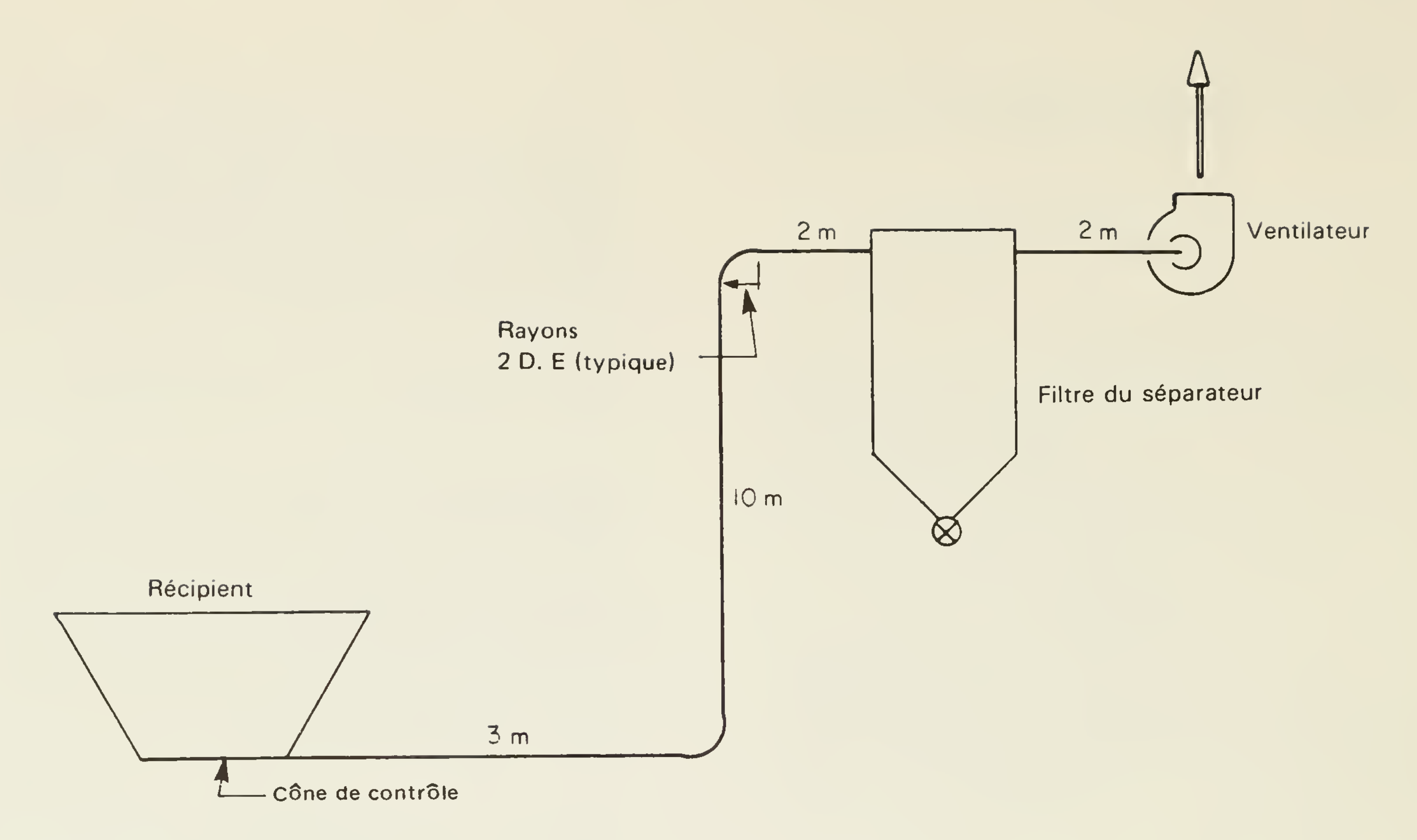


Fig. 24 Système de dépoussiérage.

La longueur équivalente de conduit est égale à :

$$17 + 18{,}4 = 35{,}4\ \text{m}$$

Calculer la perte de charge du conduit (H_p) :

$$H_p = L_e \times F_1 = 35{,}4\ \text{m} \times 8\ \text{Pa/m} = 283{,}2\ \text{Pa}$$

Calculer la pression totale du système :

$$\text{pression du système} = P_v + H_e + H_p + H_c = 240 + 56 + 283{,}2 + 1500 = 2079{,}2\ \text{Pa}$$

Choisir un ventilateur en mesure de fournir 3 060 L/s d'air à une pression de 2 079,2 Pa.

Puissance requise par le système :

$$\text{puissance} = \frac{\text{débit d'air} \times \text{pression totale}}{10^6 \times \text{rendement du ventilateur}} = \frac{3060\ \text{L/s} \times 2079{,}2\ \text{Pa}}{10^6 \times 0{,}65} = 9{,}8\ \text{kW}$$

Le rendement mécanique de la plupart des ventilateurs centrifuges est de l'ordre de 0,50 à 0,65. En accroissant le diamètre du conduit entre le récepteur et le ventilateur, on peut abaisser la consommation d'énergie. Dans ce cas, utiliser un dépoussiéreur à filtre et un ventilateur centrifuge à aubes courbées vers l'arrière ou à aubes à profil aérodynamique.

8.8 Calculs pour un transporteur pneumatique à basse pression

Problème : transporter 5,0 t/h de blé dans des conditions atmosphériques normales (fig. 25). Dans cet exemple, la vitesse approximative requise pour assurer le déplacement du blé est de 20–30 m/s (tableau 3). Choisir 25 m/s.

Le ratio «masse des matières solides/masse de l'air» maximum d'un transporteur pneumatique à basse pression est d'environ 1,0. Comme ce facteur est difficile à établir, il faut souvent procéder par tâtonnements. Par exemple, les premiers calculs peuvent rendre nécessaire l'utilisation d'une pression supérieure à la capacité d'un système basse pression; les paramètres du système doivent donc être corrigés de manière à abaisser le ratio «matières solides/air».

Outre les limites imposées par la pression, la conception d'un système est liée au coût de ses composantes.

Pour déterminer le débit d'air requis, utiliser la formule :

$$R_w = M_m / M_a$$

il s'ensuit que $M_a = M_m / R_w$

où M_m = débit – masse des matières solides (kg/s)

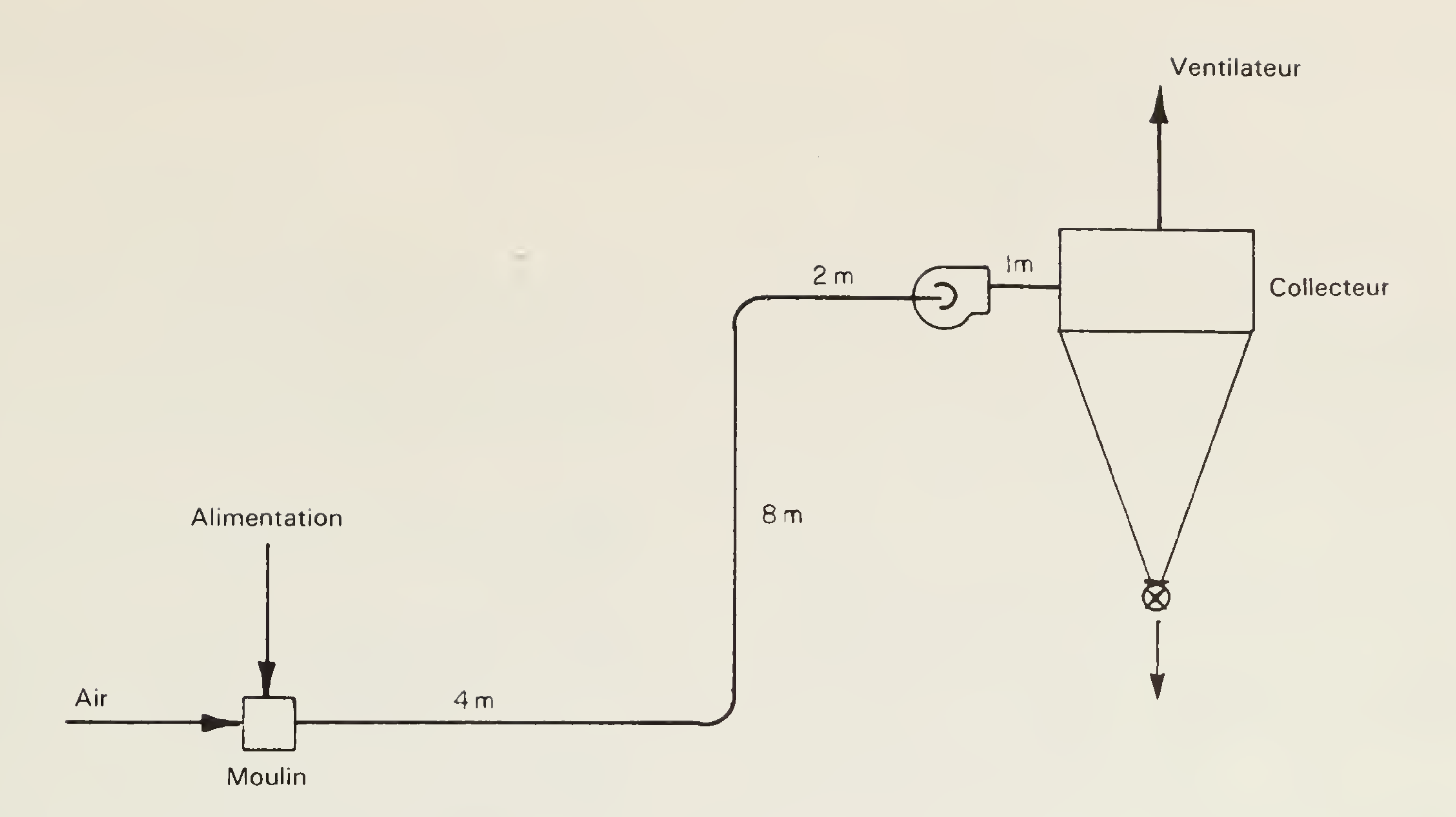


Fig. 25 Transporteur pneumatique à basse pression.

$$= \frac{5 \text{ t/h} \times 1000 \text{ kg/t}}{3600 \text{ s/h}}$$

$= 1{,}4$ kg/s

M_a = débit – masse de l'air (kg/s)

$= 1{,}4$ kg/s

Le débit d'air (Q) de l'air de référence (1,2 kg/m^3) s'écrit :

$Q = 1{,}4/1{,}2$

$= 1{,}17$ m^3/s

$= 1170$ L/s

Dans le graphique des pertes par frottement (fig. 7), choisir un conduit de 225 mm et une vitesse de 25 m/s; la perte par frottement (F_l) est égale à 30 Pa/m.

Dans ces conditions, la pression dynamique s'écrit :

$P_v = (v/1{,}29)^2$

$= (25/1{,}29)^2$

$= 376$ Pa

D'après l'appendice 3, le ratio «perte par frottement des matières solides (F_m)/perte par frottement de l'air (F_a») pour un ratio «masse des matières solides/masse de l'air» (R_w) de 1,0 est égal à :

$F_m/F_a = 1{,}35$

Calculer la longueur équivalente du système.

Longueur équivalente d'un coude d'un rayon de courbure égal à :

$= 2{,}5 \times$ diamètre (appendice 2)

$2{,}9$ m $\times$ 2 coudes $= 5{,}8$ m

Longueur équivalente de conduit vertical :

$1{,}15 \times 8$ m $= 9{,}2$ m

Longueur équivalente de conduit horizontal

$= 7{,}0$ m

Longueur équivalente totale (L_e)

L_e (air propre) $= (5{,}8 + 8{,}0 + 7{,}0)$

$= 20{,}8$ m

L_e (matières solides) $= (9{,}2 + 7{,}0)$

$= 16{,}2$ m

Considérer séparément la perte de charge des matières transportées imputable aux coudes.

Calcul de la perte de charge totale des matières transportées :

Perte de charge à la mise en vitesse des produits (H_a) :

$H_a = 2{,}25 \times R_w \times P_v$

$= 2{,}25 \times 1{,}0 \times 376$

$= 846$ Pa

Perte de charge des conduits droits (H_p) :

$H_p = (F_m/F_a) \times L_e \times F_l$

$= 1{,}35 \times 16{,}2$ m $\times 30$ Pa/m

$= 656$ Pa

Au moment d'estimer les pertes de charge imputables au frottement des matières solides, calculer séparément la perte à la hauteur des coudes et la perte dans les conduits droits.

Perte à la hauteur des coudes (H_b) :

$$H_b = N[1+2(F_m/F_a-1)] \times F_b \times P_v$$
$$= 2[1+2(1{,}35-1)] \times 0{,}22 \times 376$$
$$= 281 \text{ Pa}$$

Perte de charge des matières solides dans le système (H_m) :

$$H_m = H_a + H_p + H_b$$
$$= 846 + 656 + 281$$
$$= 1783 \text{ Pa}$$

Utiliser les formules suivantes pour calculer la perte de charge de l'air propre dans le système.

La perte d'introduction (H_e) dans un chapeau à carter, où $F = 0{,}50$ est égal à :

$$H_e = F \times P_v$$
$$= 0{,}50 \times 376$$
$$= 188 \text{ Pa}$$

Perte de mise en vitesse de l'air propre (H_a) :

$$H_a = P_v$$
$$= 376 \text{ Pa}$$

Perte de charge des conduits droits et des coudes (H_p) :

$$H_p = L_e \times F_l$$
$$= 20{,}8 \text{ m} \times 30 \text{ Pa/m}$$
$$= 624 \text{ Pa}$$

Perte de charge du récepteur (H_c) :

$$H_c = 2\,P_v$$
$$= 2 \times 376$$
$$= 752 \text{ Pa}$$

Perte de charge de l'air propre (H_{ca}) :

$$H_{ca} = H_e + H_a + H_p + H_c$$
$$= 188 + 376 + 624 + 752$$
$$= 1940 \text{ Pa}$$

Pertes de charge totales du système (H) :

$$H = H_m + H_{ca}$$
$$= 1783 + 1940$$
$$= 3723 \text{ Pa}$$

Choisir un système en mesure de fournir 1 170 L/s d'air à 3 723 Pa. L'énergie requise par ce système s'écrit :

$$\text{énergie} = \frac{1170 \text{ L/s} \times 3723 \text{ Pa}}{10^6 \times 0{,}65}$$
$$= 6{,}7 \text{ kW}$$

8.9 Calculs pour des transporteurs pneumatiques à pression moyenne ou élevée

À quelques exceptions près, la conception des systèmes à pression moyenne ou élevée suit essentiellement les mêmes principes que celle des systèmes à faible pression. Choisir des vitesses d'écoulement d'air qui suffisent à assurer le transport des produits sans bourrage. Voir cependant à maintenir la vitesse à un niveau suffisamment bas pour endommager le moins possible les grains. Les ratios «matières solides/air» sont plus élevés dans les systèmes à pression moyenne ou élevée, mais on ne dispose que de peu de données sur les ratios optimums et les vitesses requises. Il importe également de prêter attention à l'effet de l'introduction d'importantes quantités de matières solides dans le flot d'air.

Plusieurs facteurs sont à l'origine de pertes de charge de l'écoulement d'air dans les systèmes à pression moyenne ou élevée; ce sont :

- la mise en vitesse de l'air
- le frottement imputable à l'écoulement de l'air dans les conduits
- l'écoulement des produits transportés
- la mise en vitesse des matières solides
- le soutien des matières solides dans les conduits verticaux
- le frottement des produits dans les conduits
- les pertes dynamiques dans les coudes

Au moment de calculer les pertes de charge de l'écoulement d'air, tenir compte également de la compressibilité de l'air.

De façon générale, la conception des systèmes à pression moyenne ou élevée demande beaucoup d'expérience. Plusieurs publications peuvent néanmoins se révéler utiles en cette matière (voir la bibliographie).

BIBLIOGRAPHIE

ASHRAE Handbook, S.I. Edition, Atlanta : American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), 1985.

Design of Industrial Exhaust Systems. New York : Alden and Kane Industrial Press, 1939.

Commissaire fédéral des incendies, *Normes pour élévateurs à grain*, Ottawa : ministère des Travaux publics, 1978.

Evaluation Report : John Deere 6500 Forage Blower. Rapport nº EO478B. Humboldt, Sask. : Prairie Agricultural Machinery Institute, 1979.

Evaluation Report : New Holland 28 Forage Blower. Rapport nº EO478A. Humboldt, Sask. : Prairie Agricultural Machinery Institute, 1979.

Fan Application Manual : Fans and Fan Systems. Arlington : Air Moving and Conditioning Association Inc., 1973.

Industrial Catalogue. Bethlehem : Fuller Company.

Industrial Catalogue. Muncy : Koppers Company, Inc., Sprout Waldron Division.

Industrial Catalogue : Air Compressors. Mississauga : Compair Canada Inc., 1984.

Industrial Ventilation, a Manual of Recommended Practice. Lansing : American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1982.

Kleis, R.W. 1955. *Operating characteristics of pneumatic grain conveyors*. Agric. Exp. Stat. Bull. 594.

Noyes, R.T.; Pfieffer, W.E. 1985. *Design procedures for pneumatic conveyors in agriculture*. Document nº 85-3507 de l'ASAE.

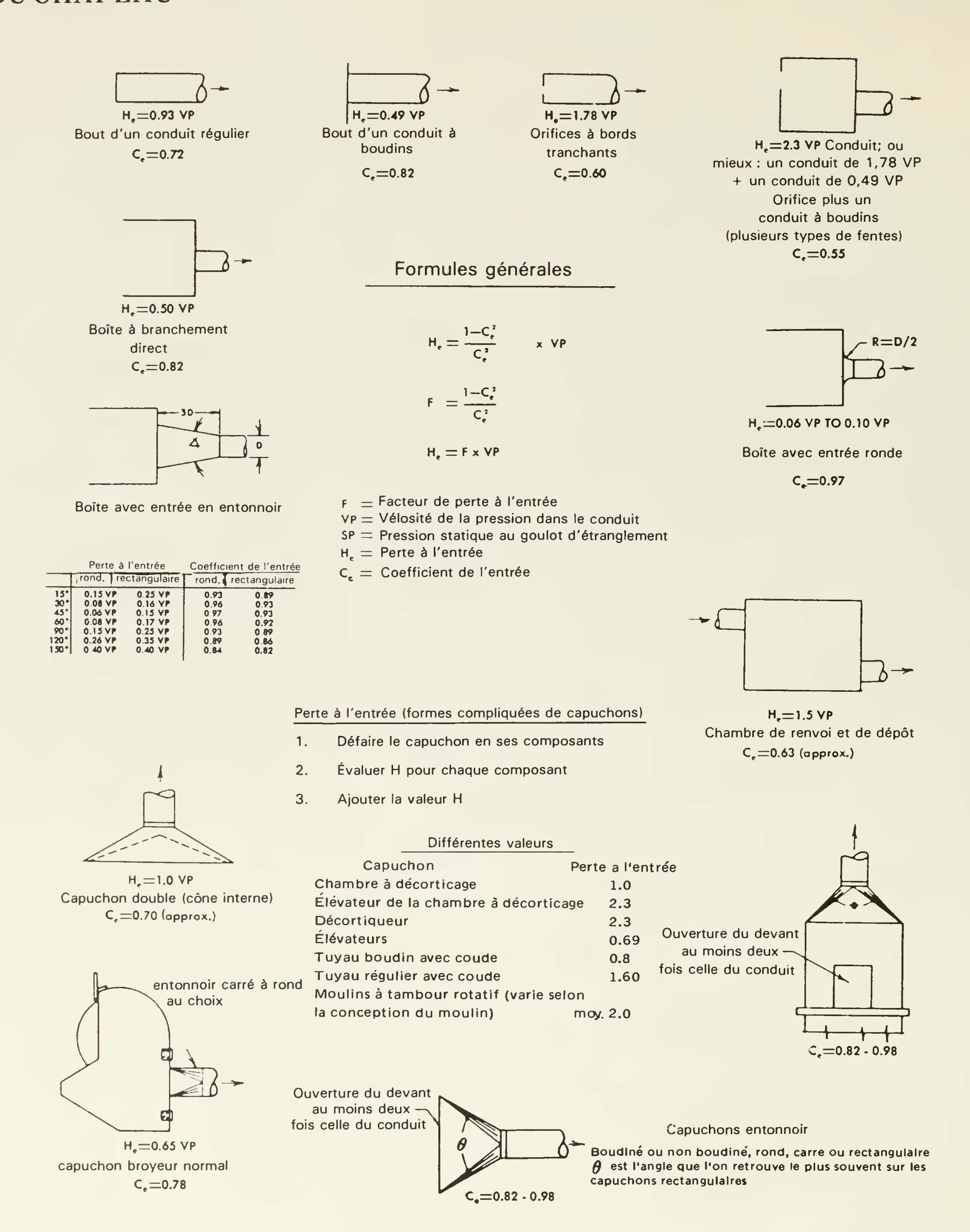
Reference data and tables. Bulletin RD-1, Summit : MikroPul Corporation, 1986.

Rider, A.R.; Barr, S.D. *Fundamentals of machine operation - hay and forage harvesting*. Moline : John Deere Service Publications, 1976.

Stepanoff. *Gravity flow of bulk solids and transportation of solids in suspension*. New York : John Wiley and Sons.

[Clausthal-Zellerfeld. 1982.] *Bulk Solids Handling*, Int. J. Storing Handl. Bulk Mater. 2(3).

APPENDICE 1 FORMULES DE PERTES D'INTRODUCTION À LA HAUTEUR DU CHAPEAU



	Perte à l'entrée		Coefficient de l'entrée	
	rond,	rectangulaire	rond,	rectangulaire
15°	0.15 VP	0.25 VP	0.93	0.89
30°	0.08 VP	0.16 VP	0.96	0.93
45°	0.06 VP	0.15 VP	0.97	0.93
60°	0.08 VP	0.17 VP	0.96	0.92
90°	0.15 VP	0.25 VP	0.93	0 89
120°	0.26 VP	0.35 VP	0.89	0.86
150°	0 40 VP	0.40 VP	0.84	0.82

Différentes valeurs

Capuchon	Perte a l'entrée
Chambre à décorticage	1.0
Élévateur de la chambre à décorticage	2.3
Décortiqueur	2.3
Élévateurs	0.69
Tuyau boudin avec coude	0.8
Tuyau régulier avec coude	1.60
Moulins à tambour rotatif (varie selon la conception du moulin)	moy. 2.0

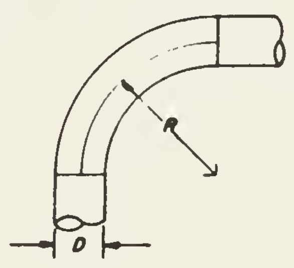
Source: Reference data and tables. Bulletin RD-1.

APPENDICE 2 LONGUEURS ÉQUIVALENTES DE CONDUITS DROITS (EN MÈTRES)

R, D			2D min, D, θ, D'		D/3, 2D, H, D/3, D, Jupon, Toit, Manchon — Non recommandé			
Tuyau (cm)	Coude 90° * Rayon de la ligne centrale			Angle de l'entrée		H, grandeur des diamètres		
	1.5D	2.0D	2.5D	30°	45°	1.0H	0.75H	0.5H
75	1.4	0.9	0.7	0.5	0.9	0.3	0.5	2.0
100	2.0	1.3	1.1	0.8	1.3	0.5	0.8	3.4
125	2.6	1.7	1.4	1.1	1.7	0.6	1.1	4.4
150	3.2	2.2	1.8	1.4	2.2	0.8	1.4	5.5
175	3.9	2.6	2.2	1.7	2.6	0.9	1.7	6.6
200	4.6	3.1	2.5	2.0	3.1	1.1	2.0	7.8
250	6.0	4.0	3.3	2.6	4.0	1.4	2.6	10
300	7.4	5.0	4.1	3.2	5.0	1.8	3.2	13
350	8.9	6.0	5.0	3.8	6.0	2.1	3.8	15
400	10	7.0	5.8	4.5	7.0	2.5	4.5	18
450	12	8.1	6.7	5.2	8.1	2.8	5.2	21
500	14	9.2	7.6	5.9	9.2	3.2	5.9	23
600	17	11	9.5	7.3	11	4.0	7.3	29
700	21	14	11	8.8	14	4.8	8.8	35
800	24	16	13	10	16	5.7	10	41
900	28	19	15					
1000	32	21	18					
1200	39	26	22					
1400	47	32	26					
1600	55	37	31					
1800	64	43	36					
2000	72	49	40					

* Pour des coudes à 60° – x0,67

Pour des coudes à 45° – x0,50

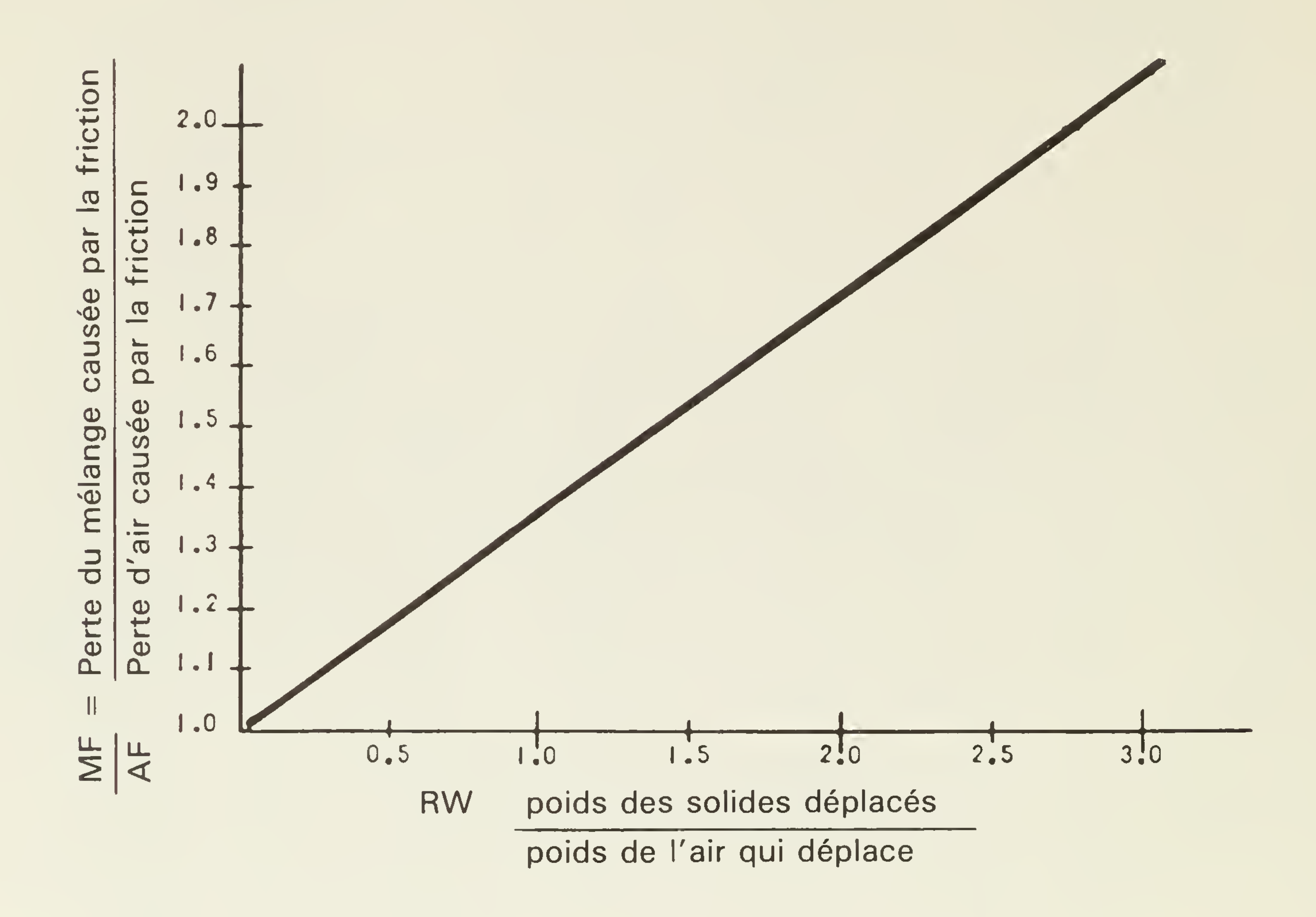


R, grandeur des diamètres	Fraction de la perte de VP
2.75 D	0.26
2.50 D	0.22
2.25 D	0.26
2.00 D	0.27
1.75 D	0.32
1.50 D	0.39
1.25 D	0.55

Coudes ronds

Source: Industrial ventilation, a manual of recommended practice.

APPENDICE 3 RAPPORT ENTRE LE FROTTEMENT D'UN MÉLANGE DE MATIÈRES SOLIDES – GAZ ET LE FROTTEMENT DE L'AIR SEULEMENT



Source: Reference data and tables. Bulletin RD-1.

